

干拓地土壤に関する研究

(第13報) 電気伝導度法による土壤塩分の測定法とその意義について

米田茂男・河内知道

A Study on Polder Soils in Japan

XIII Determination of Electrical Conductivity of Soil Extracts and its Use in Appraising Soil Salinity

Shigeo YONEDA and Tomomichi KŌCHI

A study was made of the use of electrical conductivity for determining the salt content and evaluating the salt toxicity in soils. Electrical conductivity was measured for the saturation extracts of Fukuda polder soils and salty paddy soils.

The procedure adopted for preparing a saturation extracts and determining the conductance was as follows: Distilled water was added to air dry soil and the soil mass was stirred until a condition of water saturation was reached. After 20 to 24 hours, the soil mass was filtered on a Buchner funnel and the filtrates were used for determining conductivity in special conductivity cells. It was found also that in the case of flooded paddy soils, fresh soil could be used directly for preparing the saturation extracts.

The electrical conductivity (expressed in millimhos/cm, mhos $\times 10^3$) of saturation extracts and actual salt content of 1:5 extracts were determined on a number of Fukuda polder soils, varying widely in chloride content and sulfate content. A close relationship was found to exist between the two measurements and the conductivity of saturation extracts gave rather a better measure in appraising soil salinity.

It was found that the conductivity of saturation extracts was five to eleven times greater than that of 1:5 extracts and saturation percentage was very close to Hilgard's maximum water holding capacity.

Conductivity and pH of incubated soils were determined on 150 samples of salty paddy soils. A close relationship was found to exist between conductivity and yield of rice. A fair relationship was also found to exist between pH of incubated soils and yield of rice. It appears that a large amount of sulfide accumulated in salty paddy soils affects more or less on crop growth.

緒 言

土壤に含まれている可溶性塩類の濃度の表示法は必ずしも一定していない。多くの研究者は習慣的に、土壤に対する重量パーセント又は p. p. m. 単位で表わしているが、最近では当量単位で表わす方が、より合理的であることが指摘⁵⁾されている。又オランダに於ては土壤の含塩度の指標として、しばしば土壤水分に対する塩類濃度 (in grams per liter soil moisture) が用いられ、本表示法は乾土単位量中の含塩量で表わす方法に比べて、一層合理的と報告⁵⁾されている。これらの、土壤又は土壤溶液に対する塩類濃度の直接表示法に加えて、間接表示法として土壤浸出液の電気伝導度の測定値を以て含塩度を表示する方法も広く一般に採用されている。アメリカの地域塩害研究所 (U. S. Regional Salinity Laboratory) においては、作物に及ぼす塩類の影響の判定

法として、土壤浸出液の伝導度測定法が高く評価されており、本測定値は存在する塩類の有害限界を表わすよき指標であると報じている。その理由として塩類溶液の電気伝導度と浸透圧は共に単位容積の水溶液中に溶存するイオンの数に規定される点を指摘している。

当研究室においては、従来干拓地及び塩害地の多数の水田土壤につき、主として化学分析法による土壤塩分の測定を行ってきたが、上記の、主として畑土壤を対象として報告されている電気伝導度法の結果が、水田土壤の場合にも如何なる程度に迄適用しうるかを明かにする目的で、先づ本研究の第12報¹¹⁾に供試した福田干拓地の試料を用いて化学分析法と伝導度法の比較を行い、次に瀬戸内海沿岸及び四国周辺の、地盤変動によつて生じた塩害地の水田土壤を用いて、先に報告⁹⁾した土壤の塩素含量及び反収と伝導度の間に如何なる関係が成立するかを検討し、併せて湛水下の水田土壤の伝導度の迅速測定法に関する実験を行った。

I. 土壤浸出液の電気伝導度の測定法

1. 測定法及び表示法

土壤の電気伝導度の測定値の表示法も、必ずしも一定していない。

先づ測定法の概要を述べると、土壤の浸出溶液中に、白金黒を附した面積1平方cmの白金電極2枚を1cmの間隔に挿入し、Kohrausch bridgeを用いて抵抗を測定する。この場合、電流の流れに対する溶液の抵抗は ohm 単位で測定され、場合によつてはこの抵抗の読みで含塩度を表示することもあるが、普通は伝導度で表示している。而して溶液の伝導度は抵抗の逆数であつて、次の関係が成立する。

$$\text{mhos 伝導度} = 1/\text{ohms 抵抗}$$

従つて電気伝導度は mhos/cm の次元にあり、普通 EC なる用語を以て之を表わしている。而して実際問題としては土壤溶液の伝導度は、一般にその値が非常に小であり、その標準単位 mhos/cm は基準として余りにも大きすぎて不便であるので、習慣上、適当に倍率を乗じた値を使用している。例えば伝導度値 (Conductivity value) は $\text{EC} \times 10^5$ の単位であり、又前記の米国地域塩害研究所では $\text{EC} \times 10^3$ 、即ち millimhos/cm を基準単位として採用している。本報告では以下の実験において伝導度の基準として millimhos/cm を用いる。

測定を行うには予め比伝導度既知の塩類溶液 (普通には KCl 水溶液) を用いて器抵抗 C (KCl 水溶液の比伝導度を K、その抵抗値を W とすれば $C = KW$) を求める。次に土壤浸出液の抵抗値 W' を求め、次式より伝導度 K' を求め、之を 25°C における伝導度に換算する。

$$\text{即ち } K' = \frac{C}{W'} \times 10^3 \text{ millimhos/cm}$$

2. 土壤浸出液の調製法

電気伝導度の測定は土壤：水の任意の比率について行うことができるが、測定値は後述する如く両比率の異なるに従つて変化するから、異種土壤間の比較を行い、且つ土壤分類の基準として利用するためには、一定の条件下において測定する必要がある。

筆者等は浸出液の調製法の大要は、前記米国地域塩害研究所の規定せる方法に準拠し、之を少しく変更して次の如く行つた。

風乾細土 100 g を内容 250 cc の共栓硝子罎に採り、蒸溜水を少量づつ注加しながら筥にて攪拌、捏和して飽和状態に達せしめる。而して注水の終点である飽和状態においては、土壤物質は罎を傾ける場合に辛じて流動する程度の可塑性を示し、表面は光を反射すると光沢をおびて輝き、且つ一夜放置する場合、土壤表面に 1~2 cc の遊離水を生ずる状態を呈するようにする。又本操

作中に空気は全く駆逐する必要がある。飽和状態に達したならば再び秤量し、風乾土からの増量を以て飽和含水量 (Saturation percentage) とし、風乾土に対する百分率にて示す。

本試料を 20~24 時間放置したる後ブフナー漏斗を用いて濾過し、濾液の最初の部分は捨てるか又は再び濾過する。次に濾液につき特殊の測定用器を用いて伝導度を測定する。又濾液を用いて存在する塩類を定めるために化学分析を行うこともできる。

3. 温度補正

電気伝導度の測定は、原則的には 25°C の恒温槽中にて行うべきであるが、多数の試料についての迅速測定、とくに現地測定を行う場合には、測定時の温度を記録して、温度補正を行つて標準温度 25°C の値に換算する方法が実用的には採用されている。

CAMPBELL, BOWER 及び RICHARDS¹⁾ は 30 種の含塩土及びアルカリ土を用いて飽和浸出液につき、5 段階の温度における伝導度の比較を行つた。その結果、温度 1°C 当りの伝導度の百分率にて示した変化の平均値は 0~15°, 15~25°, 25~35°, 35~50°C 当り夫々 1.79, 1.96, 2.07 及び 2.15% を示し、従つて 15~35°C の間の範囲における伝導度の平均温度係数は 1°C 当り 2.02% となると報じている。以下の実験の伝導度は本係数を用いて 25°C の値に換算した数値である。

II. 福田干拓地土壤の電気伝導度

既報¹⁾ の福田干拓地の土壤試料中、とくに塩分含量を異にする 15 試料を用いて、前記の方法によつて測定した飽和浸出液の伝導度と、常法により 1:5 浸出液を用いての全固形物、塩素及び硫酸の定量値の比較成績は Table 1 に示す通りである。

Table 1. Conductivity and Soluble Salts of Fukuda Polder Soils.

Soil No.	Depth cm	pH (H ₂ O)	Soluble salts (%) (1:5 extracts)			Conductivity of sat. ext. millimhos /cm	Saturation percentage (dry soil)	Max. water capacity (Hilgard's method)	Texture
			Total solid	Cl	SO ₃				
46-1	0-10	6.0	0.366	0.066	0.130	7.23	58.2	61.3	FL
43-1	0-27	6.8	0.472	0.222	0.069	16.23	40.5	—	S
29-3	38-47	6.5	0.594	0.284	0.063	22.56	42.5	43.0	S
47-1	0-10	6.7	0.646	0.106	0.200	12.85	77.3	—	FCL
47-2	10~	6.7	1.106	0.350	0.220	18.50	70.5	—	FL
31-3	46-75	6.1	1.248	0.514	0.135	32.80	55.9	53.4	L
7-2	16-27	6.2	1.300	0.603	0.228	25.83	69.8	67.8	FCL
7-1	0-16	5.4	1.676	0.532	0.349	29.28	64.5	63.9	FL
60-2	30~	6.2	1.696	0.807	0.240	43.63	60.9	59.7	FL
22-1	0-8	6.0	2.186	1.046	0.243	48.18	64.9	63.3	FL
14-1	0-17	5.9	2.716	1.259	0.246	59.30	59.1	56.2	FL
16-1	0-30	6.2	2.940	1.392	0.431	63.35	69.7	65.5	FL
26-1	0-30	4.2	4.088	2.120	0.358	88.95	66.5	66.1	FL
36-1	0-10	4.3	4.642	2.092	0.460	78.39	63.6	65.4	FL
64-1	0-30	5.6	5.808	2.252	0.634	115.84	63.1	64.0	L

本表においては、一応全固形物量の少い試料から多い試料の順序に排列したが、Table 1 より明かな如く、この順序は必ずしも伝導度の大小の順序と一致しない。かくの如く両順序に差異を生じた第一の原因は、所含塩類の組成に差異があるためで、とくに構成塩類として塩化物と硫酸

塩の何れが主要部分を占めるかが問題のようである。

各種塩類の水溶液の濃度を重量パーセントで示す場合、塩類が異なると同じ濃度の水溶液においても電気伝導度に差異を生じることは周知の通りで、例えば NaCl と Na_2SO_4 の 0.5% 水溶液の伝導度は前者の 9.02 millimhos/cm に対して後者は 6.5 millimhos/cm を示した。従つて構成塩類として塩化物の比率が硫酸塩に比べて増大するに伴つて、仮に全固形物量は同一であつても伝導度は増大するわけで、この傾向は Table 1 の成績にも現われている。例えば 29-3 試料と 47-1 試料を比較する場合、両試料の全固形物量と伝導度の値の大小は逆の関係になつてゐるが、前者では塩化物が、又後者では硫酸塩が主体となつてゐることが判る。

かかる事実は所含塩類の大部分が単一塩類、例えば塩化物のみよりなる土壤間の比較においては余り問題でないが、福田干拓地土壤の如く硫酸塩含量の可なり多い試料が相当部分を占める場合には、単に全固形物量又は塩素含量のみによつて塩類の作物に及ぼす影響を判断することは誤りで、むしろ伝導度の測定値によつて論ずることが合理的であることを示している。

次に全固形物量と伝導度の大小順序に不一致を来した第二の原因として、1:5 浸出液は飽和浸出液に比べて土壤に対する水の割合が大なることに基づく塩類の溶出量の差異を指摘することができる。両浸出液に溶存する塩類の量を、浸出液 100 cc 中の g 数で示せば Table 2 の通りである。

Table 2. Soluble Salts and Conductivity of 1:5 Extracts and Saturation Extracts.

Soil No.	Soluble salts and conductivity of 1:5 extracts				Soluble salts and conductivity of sat. extracts			
	Conductivity millimhos /cm	Soluble salts g/100cc			Conductivity millimhos /cm	Soluble salts g/100cc		
		Total solid	Cl	SO_3		Total solid	Cl	SO_3
46-1	1.19	0.073	0.013	0.026	7.23	0.744	0.071	0.295
43-1	1.43	0.094	0.044	0.014	16.23	1.260	0.531	0.178
29-3	2.22	0.118	0.057	0.013	22.56	1.624	0.744	0.185
47-1	2.41	0.129	0.021	0.040	12.85	1.240	0.248	0.446
47-2	3.12	0.221	0.070	0.044	18.50	1.600	0.603	0.343
31-3	4.29	0.249	0.103	0.027	32.80	2.408	1.064	0.343
7-2	3.85	0.260	0.121	0.046	25.83	1.936	0.780	0.375
7-1	4.23	0.335	0.106	0.070	29.28	2.388	0.869	0.480
60-2	5.58	0.339	0.161	0.048	43.63	3.748	1.489	0.604
22-1	7.62	0.437	0.209	0.049	48.18	3.704	1.720	0.412
14-1	9.03	0.543	0.252	0.049	59.30	4.576	2.181	0.418
16-1	9.27	0.588	0.278	0.086	63.35	5.024	2.340	0.599
26-1	14.00	0.817	0.424	0.072	88.95	7.872	3.688	0.796
36-1	12.03	0.928	0.418	0.092	78.39	6.976	3.227	0.809
64-1	16.33	1.161	0.450	0.127	115.84	10.712	4.858	1.231

Table 2 の成績より明かな如く、浸出液 100 cc 中の全固形物量は飽和浸出液の方が著しく多く、1:5 浸出液に比べて 10 倍量若しくはそれ以上の場合も少なくなく、同様の現象が塩素及び硫酸の溶解量にも認められる。次に両浸出液中の全固形物量を比較するに、その大小順序には可なりの相違がみられ、且つ夫々の浸出液についても全固形物量と伝導度の大小順序は必ずしも一致せず、とくにこの傾向は塩類濃度の高い飽和浸出液の場合に顕著である。その理由は前記の如く溶存塩類の組成の差に起因することは明白である。

次に 1:5 浸出液と飽和浸出液の伝導度を比較するに、後者の値は前者の 5~11 倍に当り、

既往の多数の研究報告と同様に土壤の一定量に添加する浸出水の量を多くすると共に伝導度は急激に減少すること、従つて伝導度を基準として土壤間の比較を行う場合には土壤:水の比率を小さくすることは、換言すれば浸出水の割合を多くすることは合理的でないことを知つた。更に両浸出液の伝導度の比率が一定でなく、試料によつてかなりの差異のあることは、土性を異にする土壤間の比較実験においては土壤:水の比を劃一的に、例えば 1:1 の如く定めることも合理的でないことを意味している。かくて MAGISTED, REITEMEIER 及び WILCOX²⁾ は塩類の定量は圃場状態の水分含量に能う限り近い土壤溶液で行うべきであると述べ、且つ WILCOX⁴⁾ は多数の実験を行う場合の迅速測定法として容水量の5倍に当る水を用いて浸出する方法を提案し、山崎、寺島、荒川⁶⁾ は塩害地水田の土壤調査において本法を採用している。

本報告においては前記の如く米国地域塩害研究所で採用している飽和浸出法を用いたが、かかる水分状態が如何なる意義を有するかを検討するため、乾土当りの飽和容水量と HILGARD 法による最大容水量を比較した結果 Table 1 に示す如く両測定値はかなりの近似値を示した。換言すれば本法は HILGARD の最大容水量に極めて近い水分状態における土壤溶液の伝導度を現わすことを意味し、従つて WILCOX⁴⁾ の指摘する如く、伝導度測定に用いる土壤溶液は土性と共に変化する容水量か、それに近い点において調製されるべきである、との条件に一致することを知つた。

III. 塩害地の水田土壤の電気伝導度

筆者等は農林省岡山農地事務局と協同して昭和26年より5年間に亘り、南海大地震による地盤変動の結果として中国地方の瀬戸内海沿岸及び四国周辺に発生した塩害地の水田土壤の調査を行い、その成果は既報⁷⁾⁸⁾⁹⁾の通りであるが、本実験においては先に供試せる土壤の伝導度を測定し、既報の成績との比較を試みた。

既報の如く、海岸沿いに分布する、いわゆる塩害発生田における水稻の生育障害の原因は頗る複雑であつて、塩類過多に基く直接的な生育障害の外に、塩害地の共通条件の一つである含塩地地下水位の高位置の存在に基く障害もある。更にかかる排水不良の水田では硫化物の異常集積を生じている場合も多く、可溶性硫化物や硫化水素による生育障害も少くないことを認めた。

因つて水稻生育に及ぼすこれらの各因子の影響を比較考究する目的で、(1) 塩類過多の判定基準として土壤の塩素含量及び伝導度、(2) 硫化物の異常集積を生じている場合は incubate せる試料は特殊強酸性土壤に転ずることより硫化物集積の間接的判定の資料としての土壤の pH 値、(3) 地下水位及びその塩素含量、以上の測定値と水稻収量との関係を求めた。その成績は Table 3~Table 7 に示す通りである。

Table 3. Salt Content and Conductivity of Paddy Soils.

(1) Coast of Kojima Bay, Okayama Pref. (1951—52)

Soil	pH air dry soil	Soluble salts		Conductivity of sat. ext. millimhos /cm	Texture & Saturation percentage	Ground water		Yield of rice Koku per tan
		Cl %	Total solid %			water level cm	Cl %	
Sanban								
4-1	6.3	0.033	0.103	3.52	L, 51.3	86	0.175	2.8
5-1	6.1	0.033	0.079	2.36	L, 52.1	62	0.126	2.75
6-1	5.5	0.031	0.080	3.22	S L, 44.1	82	0.220	2.87
8-1	5.0	0.174	0.432	7.90	C L, 64.8	85	0.296	2.6

11-1	5.4	0.270	0.715	12.90	L, 61.5	25	0.337	1.6
12-1	4.7	0.188	0.424	10.75	L, 54.1	31	0.388	2.0
13-1	5.4	0.091	0.244	4.40	L, 63.8	76	0.643	2.0
Okita								
1-1	5.4	0.064	0.175	4.12	L, 51.5	85	0.710	2.75
2-1	5.2	0.157	0.347	8.52	L, 56.0	80	0.890	2.00
4-1	5.1	0.456	1.220	23.34	C L, 63.1	42	0.490	1.2
5-1	4.5	0.359	1.071	12.67	C L, 57.0	10	0.300	0.4-0.8
8-1	5.2	0.175	0.312	10.34	C L, 59.3	59	0.660	1.2
Mitsumasa								
2-1	4.9	0.053	0.130	4.40	L, 50.5	68	0.609	2.2
3-1	5.6	0.053	0.120	3.28	S L, 46.4	85	0.446	2.3
4-1	4.7	0.085	0.204	5.36	L, 51.5	60	0.735	2.4
5-1	5.1	0.049	0.176	4.55	L, 51.2	62	0.139	2.4
6-1	5.1	0.042	0.076	3.55	S, 40.1	65	0.531	2.75
7-1	5.2	0.011	0.086	1.43	L, 53.0	87	0.031	3.1
10-1	4.9	0.018	0.060	1.43	C L, 59.2	72	0.014	2.7
Tsuda								
2-1	4.1	0.410	0.898	20.16	C L, 63.8	34	0.895	0.25
3-1	4.8	0.078	0.292	8.79	S L, 45.9	42	0.289	1.0
4-1	5.3	0.533	1.508	28.32	C L, 59.6	59	0.755	1.2
6-1	5.3	0.226	0.540	13.34	L, 55.3	83	0.214	2.2
7-1	5.0	0.039	0.824	8.27	L, 50.9	54	0.017	2.4
8-1	4.6	0.018	0.110	1.99	L, 58.0	71	0.170	2.6
Kyuban								
1-1	4.8	0.430	1.051	29.53	L, 48.5	25	1.294	0
3-1	4.6	0.226	0.440	10.46	L, 61.8	62	0.505	1.5
5-1	5.9	0.042	0.174	2.98	S L, 45.8	51	0.079	2.0
6-1	5.3	0.070	0.206	4.21	L, 64.5	49	0.316	2.7
7-1	6.5	0.021	0.114	2.45	S L, 44.0	35	0.007	1.9
9-1	5.8	0.014	0.074	1.37	S L, 46.5	49	0.028	2.6
Saidaiji								
1-1	5.3	0.516	1.064	27.38	S L, 47.4	20	0.406	0.4
3-1	5.4	0.011	0.072	0.85	L, 57.4	38	0.014	2.4
4-1	5.8	0.032	0.150	4.17	L, 49.7	24	0.198	2.2
5-1	5.3	0.014	0.096	2.41	L, 47.0	37	0.039	2.75
6-1	6.6	0.014	0.104	2.06	L, 56.2	76	0.007	2.8
7-1	4.6	0.014	0.122	2.28	SiL, 51.5	77	0.021	2.6
8-1	5.1	0.007	0.108	1.56	L, 47.6	59	0.016	2.8
9-1	5.5	0.014	0.074	2.13	SiL, 59.3	80	0.076	3.0
Kojima								
3-1	4.9	0.035	0.128	2.39	L, 54.9	65	0.346	2.4
9-1	6.6	0.011	0.030	0.74	SiL, 46.8	63	0.035	2.6
11-1	5.0	0.049	0.206	3.65	L, 56.7	61	0.141	2.2
13-1	5.5	0.018	0.070	1.82	L, 54.8	57	0.113	2.6

Table 4. Salt Content and Conductivity of Paddy Soils.
(2) Coast near the estuary of Hino River, Yamaguchi Pref. (1953)

Soil	Cl %	Conductivity of sat. ext. millimhos /cm	Texture & Saturation percentage	Ground water		Yield of rice Koku per tan
				water level cm	Cl %	
Natajima						
1-1	0.248	16.57	L, 51.4	30	0.061	1.3
Yoshikawa						
1-1	0.364	21.66	C, 75.2	0	0.297	0
7-1	0.177	12.50	SiL, 51.2	47	0.452	0.4

Table 5. Salt Content and Conductivity of Paddy Soils.
(3) Coast near the estuary of Yoshino River, Tokushima Pref. (1953)

Soil	pH incubated soil	Cl %	Conductivity of sat. ext. millimhos /cm	Texture & Saturation percentage	Ground water		Yield of rice Koku per tan
					water level cm	Cl %	
Tokushima							
1-1	5.3	0.082	6.94	S L, 43.6	36	0.105	1.5
2-1	4.0	0.234	15.80	S L, 45.7	39	0.326	0.6
3-1	5.3	0.050	4.49	SiL, 47.2	47	0.120	0.27
4-1	5.7	0.135	6.81	C L, 63.0	58	0.012	2.1
5-1	5.8	0.255	10.45	C L, 58.7	55	0.942	0.5
6-1	3.7	0.082	5.83	L, 44.3	54	0.072	1.2
7-1	6.5	0.021	2.17	S L, 40.5	—	—	2.1
8-1	6.3	0.028	3.70	L, 55.7	—	—	1.2
9-1	6.5	0.298	13.88	C L, 59.1	43	0.023	1.7
10-1	4.7	0.067	6.35	S L, 41.6	56	0.631	0.6
11-1	3.8	0.465	25.47	S, 39.0	45	1.231	0
12-1	4.1	0.014	8.39	S, 34.3	32	0.076	1.6
Komatsujima							
1-1	4.1	0.025	2.61	C L, 66.0	40	0.014	1.2
2-1	4.9	0.099	4.60	L, 53.8	48	0.004	1.5
3-1	4.1	0.461	28.88	L, 45.2	67	0.714	0.4
4-1	5.6	0.064	6.06	S L, 42.9	45	0.016	1.0
6-1	5.6	0.028	1.91	SiL, 47.7	—	—	2.3
7-1	5.2	0.053	2.73	SiL, 52.0	68	0.002	1.8
Naruto							
1-1	5.5	0.007	1.91	S L, 33.0	68	0.014	1.8
3-1	5.6	0.021	2.48	S L, 44.9	85	0.014	2.0
4-1	5.5	0.053	4.60	S, 30.1	57	0.120	2.5
5-1	6.1	0.011	1.50	S L, 36.8	47	0.012	0.7
6-1	5.6	0.007	2.5	S, 28.6	70	0.010	2.5 (麦)
Matsushige							
1-1	4.1	0.035	5.09	S, 30.9	58	0.960	0
2-1	3.7	0.046	4.55	L, 51.7	57	0.032	2.4
3-1	5.0	0.050	6.56	S, 27.5	57	0.056	0.6

	4-1	5.3	0.163	15.58	S, 31.0	45	0.292	0.9
	5-1	4.4	0.028	2.36	S, 29.7	35	0.010	0
	6-1	4.8	0.131	6.06	L, 51.6	42	0.078	1.4
Kawauchi								
	1-1	5.3	0.046	2.67	CL, 59.6	78	—	3.0
	2-1	5.3	0.089	4.96	CL, 75.1	63	0.008	2.5
	3-1	4.7	0.071	3.52	CL, 75.8	65	0.028	2.0
	4-1	4.3	0.021	2.93	S, 29.6	82	0.058	1.0
	5-1	3.8	2.074	36.00	S, 34.2	58	1.292	0
	6-1	4.5	0.138	9.42	S, 30.9	68	0.718	0
Ōtsu								
	1-1	5.1	0.170	10.32	L, 51.5	40	0.280	0.35
	2-1	2.2	0.191	11.21	L, 60.4	50	0.584	0.4
	3-1	5.0	0.269	15.58	SiL, 56.8	50	1.445	1.2
	4-1	5.0	0.284	12.11	S, 35.6	65	1.066	0.5
	5-1	4.2	0.128	8.79	L, 55.8	57	1.190	1.2
	6-1	5.3	0.071	6.67	L, 54.5	75	0.397	1.6
	7-1	5.6	0.028	2.58	CL, 57.6	70	0.045	2.3
Kitajima								
	1-1	—	0.142	9.91	SL, 42.0	68	0.164	1.6
	2-1	—	0.011	1.58	L, 53.1	—	—	2.65
	3-1	4.7	0.043	5.01	SiL, 52.6	—	—	2.1
	4-1	4.6	0.174	12.90	S, 33.5	28	0.564	2.0
	5-1	4.7	0.121	7.69	CL, 67.4	37	0.088	2.1
	6-1	2.9	0.057	8.39	S, 27.0	40	0.544	1.0
	7-1	5.3	0.277	16.83	SiL, 58.7	90	1.242	1.2
	8-1	—	0.025	2.93	S, 30.4	50	0.356	1.7

Table 6. Salt Content and Conductivity of Paddy Soils.
(4) Coast of Tosa Bay, Kōchi Pref. (1952)

Soil	pH incubated soil	Cl %	Conductivity of sat. ext. millimhos /cm	Texture & Saturation percentage	Ground water		Yield of rice Koku per tan	
					water level cm	Cl %		
Kōchi								
	11-1	4.7	0.310	16.47	L, 49.7	58	0.848	1.3
	15-1	3.7	0.116	11.91	L, 45.5	40	0.150	0.9
	23-1	6.1	0.528	23.53	SiL, 58.8	68	1.149	1.6
	27-1	4.5	0.109	9.53	SL, 45.1	54	0.794	1.2
	31-1	4.3	0.201	10.03	SiL, 55.2	60	0.754	0
	36-1	4.6	0.238	13.83	CL, 58.7	52	0.830	2.3
Inahu								
	2-1	4.5	0.007	2.10	CL, 59.0	45	0.003	0.4
Yoshikawa								
	2-1	5.4	0.142	7.20	L, 50.6	95	0.116	1.5
	3-1	4.5	0.021	2.54	CL, 58.7	38	0.010	0.3
Ōtsu								
	1-1	4.5	0.136	8.57	CL, 59.7	42	—	0.8

Table 7. Salt Content and Conductivity of Paddy Soils
(5) Imabari, Saijo and Niihama, Ehime Pref. (1953)

Soil	pH incubated soil	Cl %	Conductivity of sat. ext. millimhos /cm	Texture & Saturation percentage	Ground water		Yield of rice Koku per tan
					water level cm	Cl %	
Imabari							
1-1	2.7	0.128	11.05	L, 46.2	52	0.037	0
4-1	4.9	0.028	3.38	S L, 35.0	38	0.044	1.2
Tomita							
1-1	5.1	0.106	11.39	S, 41.1	22	0.047	0.97
2-1	5.1	0.014	2.39	S, 37.0	22	0.047	1.48
3-1	5.0	0.032	3.98	S, 34.5	21	0.124	1.15
4-1	5.0	0.014	1.65	L, 42.5	45	0.005	2.3
Kusuka							
1-1	4.1	0.312	23.32	L, 52.7	74	0.573	1.6
4-1	5.4	0.050	5.78	S L, 46.6	48	0.084	1.5
Kuniyasu							
1-1	4.0	0.089	10.75	S L, 48.7	—	0.168	1.2
2-1	5.6	0.032	2.51	L, 49.5	37	0.009	2.25
3-1	5.1	0.011	1.84	S L, 46.1	52	0.042	2.25
Niugawa							
1-1	5.1	0.067	8.57	L, 49.8	—	—	0.9
2-1	3.6	0.167	10.05	L, 50.3	23	0.201	0.8
3-1	5.1	0.050	4.84	L, 51.8	50	0.239	0.8
4-1	3.8	0.053	9.65	L, 41.2	—	—	2.4
6-1	5.1	0.025	3.03	S L, 51.8	42	0.533	2.4
7-1	3.8	0.074	6.00	L, 46.5	30	0.037	1.2
8-1	5.2	0.106	7.24	L, 54.4	0	0.106	1.2
Saijyo							
8-1	4.2	0.039	4.66	S, 40.8	13	0.078	1.49
10-1	3.0	0.142	8.03	SiL, 66.4	0	0.168	0.4
13-1	—	0.039	2.49	SiL, 54.2	44	0.097	0.8
Niihama							
1-1	2.9	0.067	6.14	C, 76.0	65	0.015	1.6
3-1	—	0.011	1.13	S L, 42.2	150	—	2.4
4-1	4.0	0.188	12.90	SiL, 62.2	42	0.139	1.3
5-1	4.7	0.025	1.84	SiL, 56.3	51	0.009	1.85
Takahama							
1-1	—	0.528	34.72	SiL, 52.2	0	—	0
2-1	4.0	0.050	4.18	SiL, 42.5	41	0.018	1.5
3-1	2.9	0.085	5.95	C L, 56.6	0	—	0
5-1	4.6	0.177	12.69	S L, 43.3	34	0.175	0.6
6-1	3.6	0.131	13.58	S L, 42.3	54	0.263	1.8
7-1	3.3	0.018	2.95	C L, 59.7	53	0.004	2.4
Kakiu							
1-1	—	0.021	2.42	S, 32.6	32	0.040	2.4
2-1	5.2	0.018	1.89	S, 33.3	30	0.007	2.4
3-1	2.4	0.372	25.81	L, 50.6	55	0.150	1.4

Sakurai								
3-1	4.1	0.113	12.51	S L, 38.3	0	0.161	0.6	
Yoshii								
1-1	—	0.216	9.93	C L, 59.4	36	1.051	0.4	
2-1	—	0.018	1.91	SiL, 46.2	40	0.051	1.7	
3-1	4.4	0.021	1.84	SiL, 51.2	55	0.013	2.0	
4-1	3.9	0.053	3.33	L, 47.6	46	0.073	2.4	
Kōzato								
1-1	4.8	0.025	2.82	S L, 37.9	18	0.345	2.45	
Miyoshi								
1-1	4.7	0.018	2.42	L, 47.0	32	0.004	1.6	
2-1	5.5	0.028	2.60	L, 48.7	47	0.022	1.4	
3-1	—	0.025	2.76	L, 47.0	40	0.015	1.5	
4-1	—	0.014	2.19	L, 53.5	65	0.007	1.6	

土壌の反応、含塩量及び地下水の状態は地域によつて、更に同一地域内においても個々の地点によつてかなりの差異があり、従つて水稻の反当収量にも大差が認められる。而して各地域別にみた土壌及び田面水の塩素含量、湛水土壌及び incubate せる土壌の間の反応の変化、とくに特殊酸性土壌の分布等の詳細は既報⁹⁾の通りである。又 Table 3~Table 7 の成績より明かな如く、土壌の塩素含量と伝導度の間には可なりの相関々係が認められる。而して伝導度と水稻収量との関係、とくに塩害の判定の指標としての伝導度の意義については次章で考察する。

IV. 塩害の判定の指標としての電気伝導度の意義

前記の如く、いわゆる塩害の発生の機作は頗る複雑で、Table 3~Table 7 の成績を検討する場合も水稻の収量は各種の因子によつて制約され、従つて単一の因子のみを基準として塩害程度を判定することは不可能であることが判る。而して問題を単一化する意味から、一応塩害の原因を塩類過多に基づく生育阻害と云う点のみに限定して、以下考察を試みる。

増地の塩類過多に起因する直接的な塩害の機作には (1) 土壌溶液の滲透圧の増加による植物根の水分吸収の阻害を結果する塩類の直接的な物理的作用、(2) 過量の塩分を溶存する土壌溶液からの特殊イオンの異常吸収、即ち特殊イオンの植物体内における異常集積に基く栄養と代謝の阻害を結果する塩類の直接的な化学的作用、以上の2つが指摘できる。而してこの両因子の何れが主要原因をなすかは構成イオンの質に左右され、特殊な有害イオンの存在の下では (2) の化学的作用が制約因子となるが、然らざる場合は、何れかと云へば (1) が主で (2) は従の関係が成立すると考える。このことは NaCl 又は Na_2SO_4 の如き中性塩類の単一塩類又は若干の塩類混合物を用いての栽培試験において、植生に及ぼす相対的有害度は、個々の塩類に関しては略々土壌溶液中の塩類濃度に比例する事実によつても明白である。但し塩類を異にすると、濃度と有害度が必ずしも一致しないのは、個々のイオンの化学的作用に差異のある証拠である。従つて塩類の直接的害作用は濃度+ α の現象と解釈すべきで、且つ α の値はイオンの種類によつて異なるのみならず、又植物によつても異なるものである。

HAYWARD 及び SPURR (1943) は CaCl_2 , NaCl 及び Na_2SO_4 の水溶液を等滲透圧に保つときは、水分吸収と植生に略々同じ制約を生じること認めたが、他方これらの塩類を同じ重量濃度で比較すると若干の差を生じ、NaCl は Na_2SO_4 に比べて有害作用は大で、その理由の一つとして滲

透圧の差が指摘されている。

従来土壌の研究においては習慣的に塩類濃度を乾土に対する重量パーセント又は p. p. m. 単位で示しているが、本表示法には次の2つの欠点が指摘されている。その第一は、圃場状態においては土性、腐植含量等によつて土壌の水分状態に差のあること、第二は塩類の種類が異なると同一濃度においても土壌溶液の滲透圧に差のあること、以上の2点である。

而して塩類溶液の電気伝導度は滲透圧と同じく単位容積の水中に溶存するイオン数に規定され、米国地域塩害研究所の報告によると平均して土壌溶液の滲透圧は millimhos/cm 単位で表わした伝導度の約36%に相当している。即ち

$$\text{滲透圧} = 0.36 \times \text{EC} \times 10^3$$

従つて飽和浸出液の伝導度が 10 millimhos/cm の場合は、浸出液の滲透圧は約 3.6 気圧に相当する。而して圃場含水量は飽和状態で含まれる水分の約 1/2 であるから、この場合圃場含水量における土壌溶液中の滲透圧は約 7.2 気圧に当ると云う。

更に同研究所においては作物生育と土壌の含塩度の関係を一目して関連づける目的で Fig. 1 の如き図表を作製している。

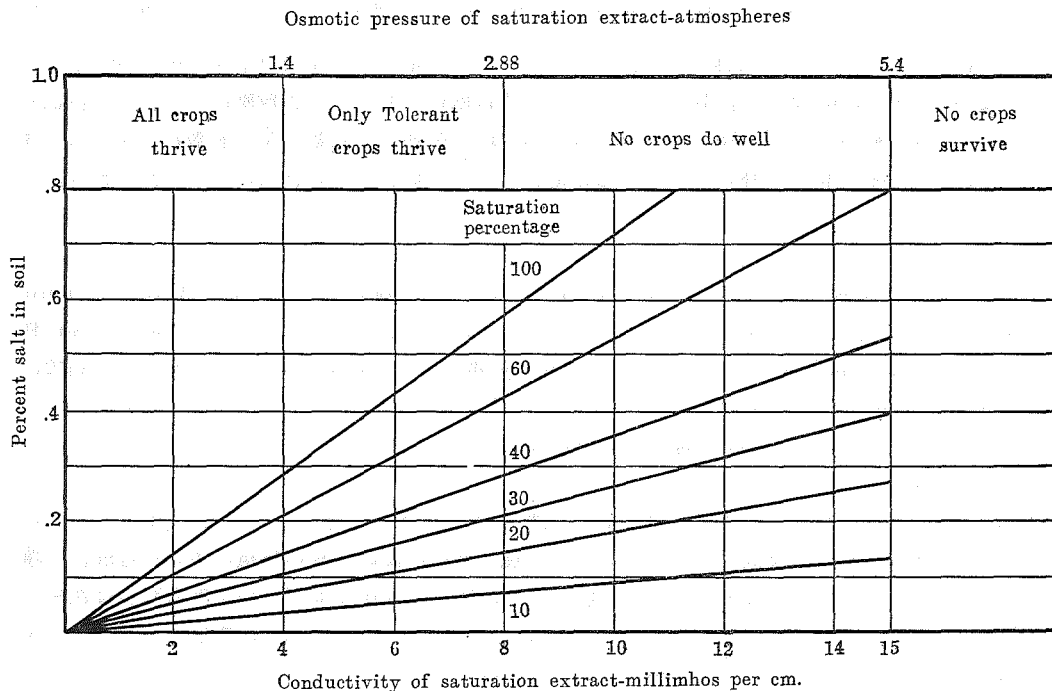


Fig. 1 Graphical representation of the relation of plant growth to the conductivity and osmotic pressure of the saturation extract and to the per cent of salt in soil. (Drawn from "IRRIGATED SOILS.")

Fig. 1 の下の横軸には植生と関連しての土壌含塩度の一般的限界を飽和浸出液の伝導度で示し、上の横軸には塩害徴候によつて分けた各段階の境界線における飽和浸出液の滲透圧を示している。又対角線は土壌含水量の大小を考慮して、個々の試料について飽和浸出液の伝導度と土壌の含塩量の百分率を関係づける線である。

本図によつて土壌試料の分析結果を解明できるが、1例を示すと、土壌の飽和含水量が60%、伝導度が 7 millimhos/cm の場合は、その土壌では耐塩性作物の生育のみが可能で、重量単位で

0.38%の塩分を含有し、且つ浸出液の滲透圧は2.5気圧に相当している。

筆者等は上記の図表で示されている伝導度と植生の関係が塩害地の水田に如何なる程度迄適用しうるかを判定する目的で、Table 3~Table 7の成績から伝導度と水稻収量との関係を求めたが、その成績はTable 8に示す通りである。

Table 8. Relation Between Conductivity of Paddy Soils and Yield of Rice.
(Percentage of soil samples)

Yield of rice pH of soil Conductivity of sat. ext.	0—1.0 Koku per tan		1.0—2.0 Koku per tan		2.0—2.5 Koku per tan		2.5—3.5 Koku per tan		Sum	
	4.5<	4.5>	4.5<	4.5>	4.5<	4.5>	4.5<	4.5>	4.5<	4.5>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0—4 millimhos/cm	1.3	1.3	8.7	1.3	12.0	2.0	12.0	0	34.0	4.6
4—8 millimhos/cm	2.7	2.7	6.0	3.3	4.0	2.0	2.7	0.7	15.4	8.7
8—15 millimhos/cm	6.0	5.3	2.0	6.7	4.0	0.7	0	0	12.0	12.7
15 millimhos/cm<	3.3	3.3	4.7	1.3	0	0	0	0	8.0	4.6
Sum	13.3	12.6	21.4	12.6	20.0	4.7	14.7	0.7	69.4	30.6

本表においては水稻の生育障害の強弱の目安として反収を基準にとり、A: 0—1.0石、B: 1.0—2.0石、C: 2.0—2.5石、D: 2.5—3.5石の4段階に分ち、その各段階について飽和浸出液の伝導度が0—4、4—8、8—15、15 millimhos/cm以上を示す試料数の全試料数に対する百分率を求めた。且つ特殊酸性土壌においては塩類過多に加えて硫化物の害作用が大きい点に鑑み、各段階につき、夫々pH 4.5以上の場合と、pH 4.5以下の場合に2区分して、その百分率を示した。

先づ収量と伝導度の関係をみるに、反収1.0石以下の土壌においては、伝導度が8 millimhos/cm以上の試料の百分率は、それ以下の試料の倍以上の値を示しているが、反収の増加に伴つて8 millimhos/cm以下を示す試料の割合が次第に増大し、反収2.0—2.5石の範囲の試料では15 millimhos/cm以上の試料は、又反収2.5—3.5石の範囲の試料では8 millimhos/cm以上の試料は皆無となつている。即ち土壌溶液の伝導度と水稻収量との間にはかなりの相関々係の成立することが判る。

次に土壌の反応と収量との関係をみるに、反収1.0石以下の土壌においては、pH 4.5以上の試料と、以下の試料は略々同じ割合を占め、この種の水田には硫化物の集積の多い特殊酸性土壌の分布の少くないことを示唆する一方、反収の増加に伴つてpH 4.5以下の試料の割合は次第に減少し、とくに反収2.5石以上の水田では試料23点中僅か1点をみるに過ぎない。従つて土壌の反応、換言すれば硫化物の異常集積と水稻の生育障害との間にも或る程度の相関々係が示されている。

而して硫化物の異常集積を示す土壌の風乾試料においては、硫化物の酸化生成物としての可溶性硫酸塩を多量に含有している結果、伝導度の値も湛水下試料に比べて増大する。かくて土壌含塩度を伝導度で示すときは、そこに硫化物の集積程度も間接的に加味される結果となり、土壌のCl含量を基準とする場合に比べて、収量との間に一層密接な関係を示す結果となつている。

V. 湛水下の水田土壌の電気伝導度の迅速測定法

本実験においては前記の如く、電気伝導度の測定は専ら米国地域塩害研究所で採用している

方法に準じて風乾土の飽和浸出液について行つた。而して湛水下の水田土壌を対象としての迅速測定において、新鮮土を直接供試する場合、如何なる条件で行うべきかを検討するため次の実験を行つた。

湛水下の試料を硝子罎に採取し、放置して、上透液を全く除去した後、試料を罎にて攪拌、捏和し、内容物をブフナー漏斗にて減圧濾過して得たる浸出液について伝導度を測定する一方、試料の水分含量を定量した。別に同一試料の風乾土を用いて常法によつて飽和浸出液を調製し伝導度を測定した。この両試料についての測定値の比較成績を示せば Table 9 の通りである。

Table 9. Conductivity determined with Flooded Paddy Soil and Air Dry Soil.

Soil No.	Locality	Depth cm	Conductivity of sat. ext. millimhos/cm		Saturation percentage		Remark
			flooded soil	air dry soil	flooded soil	air dry soil	
1	Kojima 7 Polder A	0—10	5.52	5.15	105.04	93.97	Cultivated 2 years
2	Kojima 7 Polder B	0—10	6.80	6.23	96.49	93.04	" "
3	Kojima 7 Polder C	0—10	5.90	5.35	109.43	100.00	" 1 year
4	Kojima 7 Polder D	0—10	5.90	5.27	119.62	98.67	" "
5	Kojima 7 Polder E	0—10	2.56	3.00	84.21	69.91	" 5 years
6	Kojima 7 Polder F	0—10	1.46	1.59	66.47	62.21	" "
7	Nadasaki-chō A	0—10	2.14	1.84	101.74	87.86	" about 30 years
8	Nadasaki-chō B	0—10	1.23	1.59	89.69	76.51	" "

先づ両試料の飽和容水量を比較するに、新鮮土は風乾土に比べて、何れも若干高い値を示している。

筆者等も既報¹⁰⁾の如く、干拓初期の海中に沈積せる泥土は高度の膨潤状態を呈し、最大容水量も著しく大であるが、風乾処理の反復によつて土壌の最大容水量は新鮮土に比べて減少することを認めた。この傾向は Table 9 の成績にも示されており、同じく児島干拓7区の水田土壌でも開田後1~2年目の No. 1~4 試料の飽和容水量は、開田後5年を経た No. 5~6 試料に比べて可なり高い値を示している。又夫々の試料においては新鮮土が風乾土に比べて高い値を示している。

而して伝導度は開田1~2年目の試料では、むしろ新鮮土の浸出液が高い値を示すが、年次を経過した試料では反対の傾向が認められ、必ずしも一定していない。但し両側定値の差異は比較的僅少であつて、実用的にはそれ程問題にならない程度である。従つて迅速を要する場合は新鮮土を供試して飽和浸出液を調製することのできることを知つた。

尚供試土壌中 No. 5 及び6 試料は、児島干拓7区中、A地区の水田試料で、昨年度より児島湾淡水湖より灌漑水を得ており、水稻生育も良好であるが、本土壌の含塩度は既に干拓後30年を経過した地区の水田と大差ないことは興味深い。但し No. 1~4 試料は目下工事進行中のB地区内の試作田で、含塩度も前試料に比べて稍々多いことが判る。

VI. 摘要並びに結論

福田干拓地土壌及び塩害地の水田土壌を供試して、含塩度の判定法としての電気伝導度の測定法及びその意義につき研究した。

伝導度測定用の土壌浸出液を調製するには、先づ風乾細土に飽水状態に達する迄水を加えて

攪拌、捏和し、20—24時間放置した。次にブフナー漏斗を用いて濾過し、この飽和浸出液を用いて伝導度を測定した。又湛水下の水田土壌についての迅速測定には、新鮮土を直接供試して飽和浸出液を調製できることを知った。

塩化物と硫酸塩の含量を異にする福田干拓地土壌の飽和浸出液の伝導度を millimhos/cm 単位で示した値 (mhos $\times 10^3$) と 1:5 浸出液についての化学分析成績を比較した結果、両測定値の間には有意な関係のあること、及び本試料においてはむしろ伝導度の方が土壌の含塩度と植生の関係を考察する上に合理的であることを認めた。

飽和浸出液の伝導度は 1:5 浸出液の夫に比べて 5—11 倍を示し、且つ飽和容水量は HILGARD 法の最大容水量に近似することを知った。

塩害地水田土壌 150 点につき、伝導度及び土壌反応と水稻の反当収量の関係を求めた結果、伝導度と収量及び土壌反応と収量との間に一定の相関々係の成立すること、とくに伝導度と収量との間に密接な関係の存在することを明にした。

引用文献

- 1) R. B. CAMPBELL, C. A. BOWER and L. A. RICHARDS (1948) : Soil Sci. Soc. Am., Proc., 13, 66—69.
- 2) O. C. MAGISTAD, R. F. REITEMEIER and L. V. WILCOX (1945) : Soil Sci., 59, 65—75.
- 3) D. W. THORNE and H. B. PETERSON (1950) : Irrigated Soils, Philadelphia & Toronto, Blakiston Co.
- 4) J. C. WILCOX (1947) : Soil Sci., 63:109—118.
- 5) A. J. ZUUR (1952) : Soil Sci., 74, 75—90.
- 6) 山崎伝, 寺島政夫, 荒川康雄 (1954) : 東海近畿農試研究報告栽培部, 1, 165—187.
- 7) 米田茂男, 川田登 (1953) : 岡大農土肥研報告, 2, 1—20.
- 8) 米田茂男, 川田登 (1954) : 岡大農土肥研報告, 3, 1—13.
- 9) 米田茂男, 河内知道 (1956) : 岡大農土肥研報告, 4, 1—29.
- 10) 米田茂男, 下瀬昇, 河内知道 (1956) : 岡山農試臨報, 54, 1—20.
- 11) 河内知道, 米田茂男 (1957) : 岡大農学術報告, 10, 11—18.