不飽和土の凍結における水分・溶質・温度分布の変化

溝口 勝* 中野政詩** 白井清恒**

Simultaneous Change of Water Content, Solute and Temperature Profiles in a Partially Frozen Unsaturated Soil Masaru MIZOGUCHI*, Masashi NAKANO** and Kiyotsune SHIRAI** * Faculty of Agriculture, Mie University ** Faculty of Agriculture, University of Tokyo

Abstract Soil water content, solute and temperature profiles were measured in a partially frozen unsaturated sandy loam soil at two different initial water contents and at two different freezing temperatures. The water content increased with time in the frozen part of the soil and decreased in the unfrozen part of the soil. The amount of water migration in the soil with the high initial water content was greater than that in the soil with a low content. The solute profiles changed in a manner analogous to the water content profiles in the soil with the high initial water content whereas they were relatively uniform in the soil with the low content. The temperature profiles could be divided into three different regions : a frozen, an intermediate between frozen and unfrozen and an unfrozen region. The length of the intermediate region was greater in the soil with the high initial water content than in the soil with the low content, and this length increased with time. The temperature of this region was determined by the initial water content and was equal to the temperature at which the soil water started to freeze. It is considered that these results could be attributed to the rate of phase change from liquid water to ice in the intermediate region in which soil particles, liquid water, air and ice coexist.

I. はじめに

土の凍結は、未凍土層から凍土層への水分移動を引起 こし、「凍上」と呼ばれる土の体積膨張をもたらす。この 水分移動や凍上は、土の種類、初期水分量、溶質濃度、 温度勾配などに関係しているといわれている。

Dirksen and Miller¹⁾や Hoekstra²⁾ は室内凍結実験 を行い、土の凍結過程で、含木(氷)比が凍土中で増加、 未凍土中で減少することを明らかにした。Harlan³⁾は、 これらの結果に基づき、土の凍結を水と熱の同時輸送現 象と見なし、水分移動式と熱移動式を連立させたモデル を提唱した。その後、このモデルは多くの研究者によっ て数値的に解かれ、その解が上述の実験結果と比較・検 討された。しかし、これらの実験に用いられた試料は、 粘質土系で凍上性の大きなものであったため、凍上によ って温度測定位置が移動し正確な温度分布が得られたと は思えない。さらに、Harlan モデルは土粒子移動が起

キーワード:熱学,熱力学,地温,砂壌土,土壌の物理性,土壌水,含水 比,電気伝導度 こらないという仮定の上に成立しているので,その数値 . 解を凍上の生じる実験結果と比較するのは妥当とは思え ない。

一方, Cary ら⁴)は野外土壌の凍上観察から, 土の凍 結によって, 水分のみならず溶質も移動することを明ら かにし, 溶質濃度の影響を考慮した水分移動モデルを提 唱した。また, Iwata⁵)は土壌水の化学ポテンシャル低 下に着目し, 不可逆過程の熱力学に基づいた水分移動モ デルを提唱している。しかし, これらのモデルは, 水 分・溶質・温度を同時に測定したデータがないために, その妥当性は立証されていない。

そこで、筆者らは、これらのモデルを検証する上で不 可欠な基礎的データを得るために、凍上性のほとんどな い砂壌土を用いて、無載荷・閉式の凍結実験を行い、不 飽和土の水分・溶質・温度分布の同時変化を測定した。

II. 実験方法

1.試料

試料は神奈川県総合農業 試験 場の砂 壌 土である。2 mm ふるい通過分を用いた。粒径分布および物理性⁰を

^{*}三重大学農学部 **東京大学農学部

Fig. 1 に示す。また, 乾燥密度 1.15 g/cm², 20℃ の水 分特性および不飽和透水係数⁶⁾を **Fig. 2** に示す。

2.供試体

供試体の概略を Fig. 3 に示す。内径 50mm,外径 100 mm, 高さ 300 mm のアクリル製円筒 容器に、含水比 21%に水分調整した試料を乾燥密度 1.15g/cm³ で充填 した。一様な密度にするために、試料は 15 層(各層の 厚みは 20 mm)に分けて充填した。1回の凍結実験につ き,同一寸法の供試体を2個用い,その一方には試料充 填時に熱電対を埋設した。

3. 初期条件·境界条件

凍結実験の初期条件・境界条件を Table 1 に示す。 初期含水比 w_i は、21% (pF 3.5) と 43% (pF 1.7) の2 種類に設定した。w_i=21% は、試料 充 塡後、試料











Fig. 3 Schematic diagram of soil column (mm)

 Table 1 Initial and boundary conditions of the soil column

	water content	electrical conductivity	temperature	
Initial condition	43% 5 mS/cm		4℃	
	21%	5 mS/cm	4°C	
Boundary	water	salt	temperature of the air	
condition at	open	closed	-10°C	
upper enu	open	closed	– 5°C	

からの蒸発を防止した上で 4°C のチャンバー内に50~60 時間静置した時の水分状態である。また、 $w_i = 43\%$ は、

> 試料充填後,表面に 4.7×10^{-2} mol/ kg の NaCl 水溶液(EC=5 mS/cm) 250ml を湛水浸潤し,蒸発を防止し た上で4℃ のチャンバー内に浸潤開 始から 86 時間静置した時の水分状 態である。なお,NaCl 水溶液濃度 は $w_t=21\%$ の土壌溶液濃度とほぼ 等しくなるように調整した。また, 供試体の初期水分調整時における試 料表面の撹乱を避けるために,供試 体の表面に余分に試料を充填し,冷 却開始前にこの部分を切取った。

> 供試体の側面にはグラスウール (10 mm 厚), アクリル円筒(10 mm 厚)を,底面にはアクリル円柱(30 mm高さ)を配し,さらにこれを1 辺 60 cm の立方体発泡スチロール 箱の中央に設置することにより,供

> > Trans. JSIDRE Apr. 1986

試体の表面以外を断熱した。凍結時のチャンパー内温度 は、-10[℃] と -5[℃] の 2 種類に設定し、供試体上面は これらの空気と接している。

4. 測定方法

チャンバー内温度を4℃から, -10℃および -5℃ に 設置した後, 4~30 時間経過し

た時点で供試体を高さ 2 cm ご とに切断し,以下の項目につい て測定を行った。

(1)凍結深(凍結面の位置) 陳土と未凍土の硬度の違いに着 目し、これらを薬さじで2分し、 表面から境界面までの距離を/ ギスで測定した。

(2) 凍上量 試料切断時に, 表面の隆起部4カ所の高さをノ ギスで測定し,その平均値を凍 上量とした。

(3)表面部の含水比 本実験 では、試料表面部が内部と比較 して極端に乾燥していたため、 この部分を薬さじで採取し、そ の厚みと含水比を測定した。な お、凍上が生じた場合には凍上 部の含水比を測定した。

(4) 水分分布 切断した試料 を秤量カンに採り, 105℃, 24 時間炉乾法によって含水比を求 めた。ただし,凍土中の含水比 は氷も含めた値である。また, 凍結面付近の含水比は凍土と未 凍土に分けて測定した。

(5) 溶質分布 (1)~(4)の試料 とは別に,熱電対を埋設した方 の供試体を 2 cm ごとに切断し た。この試料を広ロビンに採り, 200mlの純水を加えて振とうし, 24時間後にその上澄液の電気伝 導度を測定した。本実験の溶液 濃度の範囲では,モル濃度と電 気伝導度がほぼ比例関係にある ことが確認できたので,上澄液 の電気伝導度を乾土質量と等質 量の土壌溶液の電気伝導度に換 算し,これを溶質分布とした。

(6) 温度分布 0.1 mm 径の

クロメルーコンスタンタン熱電対を用いて,供試体中央 の鉛直方向の温度分布を連続測定した。凍上によって温 度測定位置が移動する可能性があるので,各測定点の間 隔を一定に保つために表面から0.3,0.6,1,2cm以下 1 cm ごとの10 cm までは熱電対をアクリル角柱(断面

Table 2 Freezing circumstances

type*	cooling time (h)	starting point of freezing (h)	actual tempera- ture in chamber (°C)	relative humidity in chamber (%)	frost heave (mm)	freezing depth (cm)	surface dry layer (mm)	dry layer water content (%)
(A)	4.0	2.6	-10.1	22.1	0	2.5	1.6	14.3
	7.0	.3.5	-10.4	26.0	0	5.0		8.8
	9.0	2.1	-10.4	23.7	0	8.0	2.0	7.6
	15.5	2.4	- 10. 4	24.5	0	9.0	3.0	8.0
	18.0	— ,	-10.4	25.3	0	11.7	2.9	7.5
	18.5	3.3	- 10. 1	22.9	0	11.7	4.0	7.0
		2.8(0.6)**						
	10.0	1.9	-5.3	22.3	0.	2.5	3.2	10.2
	13.75	13.2	-5.0	20.2	0	3.0	2.2	11.6
	14.0	9.25	-5.0	21.1	0	5.0	4.85	10.8
	20.0	9.9	-4.8	22.7	0	7.0	3.95	8.2
	27.0	7.3	-5.2	19.4	0	10.0	5.5	-
		8.3(4.2)**						
(C)	5.0	0.3	-10.7	20.5	1.5	2.5		43. 5***
	8.0	0.6	-10.7	23.6	0	3.5	-	
	10. 0	0.3	-10.7	22.0	1.0	5.0		14.9***
	15.0	0.3	-10.7	23.6	1.0	8.0	-	8. 3***
		0.38(0.15)**						
(D)	12.5	10.1	-5.7	20.0	0	0		-
	12.8	12.5	-5.3	21.5	0	0	-	-
	16.0		-5.3	22.9	1.0	4.6	-	14.0***
	20.0	3.8	-5.0	25.1	1.0	5.0	-	13.6***
	30.0	12.8	-5.4	18.0	0.9	7.4	-	9.3***
		9.8(4.2)**						

* initial water content, temperature in chamber

(A) 21%, -10%; (B) 21%, -5%; (C) 43%, -10%; (D) 43%, -5%

** mean (standard deviation)

*** water content of frost heaving part



Fig. 4 Volumetric solid content profiles as a function of soil depth (A) 21%, -10°C: (C) 43%, -10°C, The cooling time of each experiment is indicated in hours. The arrow shows freezing depth

景土論集(122)

積 0.25 cm²) に固定し, これを試料充塡時に埋設した。 また, 10 cm 以下は, 14, 20, 26, 28 cm の深さに, 熱 電対を側面から中央に挿入して温度を測定した。

III. 実験結果および考察

1, 凍結状況

凍結状況を Table 2 に示した。凍結実験は、初期水



Fig. 5 The relationship between freezing depth and cooling time. The penetrating rates of freezing front are indicated in cm/h





分,凍結温度の異なる4グループについて行った。各グ ループごとに、チャンバー内の温度および湿度制御を行 い、凍結実験中これらをほぼ一定に保った。

凍上量は、凍結温度による差はなかったが、初期水分 によって違いが見られた。すなわち、 $w_i=43\%$ では 1 mm 程度の凍上が生じたのに対し、 $w_i=21\%$ では凍上 が生じなかった。このとき、固相率は Fig. 4 に示すよ うに、 $w_i=43\%$ では凍結面付近で最大となり表面方向 に低下したが、 $w_i=21\%$ では深さにかかわらずほぼ一 様であった。一般に、凍上は凍土中に生じるアイスレン ズの成長によって起こる¹⁰とされる。しかし、本実験で はアイスレンズは観察されなかった。これらの結果から、 $w_i=43\%$ では間隙水の凍結によって一様に間隙が広が り凍上が生じたのに対し、 $w_i=21\%$ では間隙水が少な いために凍上が起こるまでには至らなかったものと考え られる。

凍結深と冷却時間の関係を Fig. 5 に示した。凍結面 の進行は初期水分が少ない方が速く,また凍結温度が低 い方が速かった。Jame and Norum⁸⁾は,初期水分の異 なる条件下で凍結実験を行い,凍結面の進行は初期水分 が多いほど速いという報告をしているが,本実験では逆 の結果を得た。

2. 水分分布

含水比分布の変化を Fig. 6 に示し た。なお,試料表面の乾燥層の厚みと その含水比は Table 2 に示してある。

(1) $w_i=21\%$ -10° では、含水 比が「くの字形」分布を示した。すな わち、含水比は凍結面付近で最小とな り、凍結面から表面方向に増加し、未 凍土中ではほぼ一様であった。また、 凍結面付近の最小含水比と未凍土下方 の平均含水比との差は、凍結面の進行 とともに小さくなった。一方、 -5° では、凍土中の含水比が表面方向に低 下した分布を示した。このような分布 は -10° の 4.0h にも見られる。

(2) $w_i = 43\% - 10^{\circ}$ C では、 $w_i = 21\%$ の場合と同様に「くの字形」分布 を示したが、含水比の鉛直変化は $w_i = 21\%$ よりも大きかった。 -5° C でも、 含水比の分布形は -10° C と同じであったが、その変化幅は -10° C よりも 小さかった。

これらの結果は,初期水分あるいは 凍結温度によって未凍土から凍土への

Trans. JSIDRE Apr. 1986

水分移動量が異なることを意味する。この水分移動量の 違いは、初期水分・凍結温度によって土壌水の化学ボテ ンシャルの低下速度が異なり、水分移動の駆動力に違い が生じたこと、および初期水分・凍結温度によって透水 係数が異なることによるものと推察される。

凍結過程の水分分布については、これまで数多くの実 験結果が報告されている。しかし、これらの実験では上 面が直接冷却板に接し、表面からの蒸発を抑制してい た。それに対し、本実験では上面が低温空気に接する開 放系とし、表面からの蒸発を自由にしたことが特徴であ る。この点、本実験の結果は圃場で起こる現象に近いも のと思われる。

3. 溶質分布

溶質分布の変化を **Fig. 7** に示す。同一深さにおいて、 おのおのの経過時間で電気伝導度の値に一定の差が見ら れるが、これは温度補正の際に生じた差と考えられる。

(1) $w_i=21\%$ -10° C, -5° C いずれの分布も, 含水 比分布に見られたような「くの字形」は現れず, 全層に わたってほとんど一様であった。

(2) w_i=43% -10℃, -5℃ のいずれの分布も, 含 水比分布と同様の「くの字形」となった。すなわち, 溶 質量は凍結面付近で最小となり,凍土中では表面方向に 増加し,未凍土中では下方から凍結面方向に減少する傾 向を示した。

凍土中に生じる氷が溶質を含まないと仮定すれば、液 状水の溶質濃度は未凍土中より凍土中の方が大きくなり、 溶質は凍土層から未凍土層へ拡散移動することが予想さ れる。しかし、 w_i =43%の実験結果はこれとは逆に未凍 土層から凍土層へ溶質移動が生じることを示した。これ は、 w_i =43%では溶質が液状水とともに移動したためと 考えられる。しかし、 w_i =21%では水分移動量が小さい ために、水分と溶質が同時に移動したかどうか区別する のは難しい。

ところで、土壌水中の溶質は土粒子近傍で拡散電気二 重層を形成しているといわれている。本実験では土壌に 純水を加えて懸濁液を作り、その上澄液の電気伝導度を 測定した。そのため、本実験でいう土壌水の濃度は正確 には土壌水の平均的な濃度を意味している。土粒子近傍 の水の凍結を考える上ではこの拡散電気二重層は重要な 問題であろうが、とりあえず巨視的に見て、凍結により 溶質が移動することを明らかにしたことは本実験の重要 な成果と思われる。



Fig. 7 Solute profiles as a function of soil depth.

(A) 21%, -10° C: (B) 21%, -5° C: (C) 43%, -10° C: (D) 43%. -5° C. The conductivity is for the 1:1 soil water extract. The cooling time of each experiment is indicated in hours. The arrows show the freezing depths

農土論集(122)

4. 温度分布

温度分布の変化を Fig. 8 に示した。 この図から温度分布は2期間で異なる 変化をすることがわかる。たとえば、 Fig. 8(A) に示すように、実験開始時 より3.26h経過するまでは温度が表面 から順次低下しているが,3.3h経過時 に表面付近の温度が瞬間的に -0.5℃ まで上昇し、それ以降の期間では温度 が再び表面から低下している。このよ うに温度分布が急変する原因は、その 時刻に至って初めて凍結現象が生じて 潜熱が発生するためと考えられるので, 温度分布が急変するこの時刻を凍結開 始時刻と判定した。今後、温度分布の 検討は凍結開始時刻以降の期間につい て行うことにする。なお、各凍結実験 における凍結開始時刻は Table 2 に 示してある。

凍結時の温度分布には3領域が存在 する。すなわち、Fig.8(C)で典型的 に見られるように、 -0.2° より低温 域の直線形温度分布領域、ほぼ -0.2° の一定温度領域(以降 F.F 領域と呼 ぶことにする)、 -0.2° より高温域の

15

農業土木学会論文集第122号



Fig. 8 Temperature profiles as a function of soil depth. (A) 21%, -10°C: (B) 21%, -5°C: (C) 43%, -10°C: (D) 43%, -5°C. Dashed lines show temperature profiles before soil begins to freeze. The cooling time is indicated in hours. The vertical arrows show the freezing point depressions. The horizontal arrows show the freezing depths

シグモイド形温度分布領域の3領域である。

凍結面は F. F 領域の上部 0.5~1 cm の位置にあった。 (1) $w_i = 21\%$ F. F 領域の温度は -0.5° C であった。 -10° C では, F. F 領域が凍結開始直後に明瞭に現れた が,それ以降ははっきりしていなかった。 -5° C では, F. F 領域長が時間経過とともに長くなった。

(2) $w_i = 43\%$ F.F 領域の温度は -0.2° C であった。 $w_i = 43\%$ では F.F 領域が $w_i = 21\%$ より明瞭に現れ, その長さが $w_i = 21\%$ より長かった。すなわち, $w_i = 21$ %, -10° C(Fig. 8(A)) と $w_i = 43\%$, -10° C (Fig. 8 (C)) の 10 h における温度分布を比較すると, $w_i = 21$ %の F.F 領域長は深さ 8~10 cm のおよそ 2 cm であ ったのに対し, $w_i = 43\%$ の F.F 領域長は深さ 4~10 cm の 6 cm であった。一方, $w_i = 43\%$ で -10° C と -5° C の分布を比較すると, -5° C の方が -10° C よりも F.F 領域が長かった。なお, $w_i = 43\%$ でも $w_i = 21\%$ と同じ ように, F.F 領域は時間の経過とともに長くなった。 凍結時の温度分布については, Jame and Norum⁸, Fukuda ら⁹, 等の実験結果があるが, これらの実験は

上面および下面を一定温にした境界条件で測定している

こと、温度測定位置の間隔が粗いなど の理由から,本実験のような3領域分 布は得られていない。しかし、本実験 では土の凍結時に F.F 領域が生じ, その温度が初期水分によって決定され ること、およびその領域長が時間の経 過とともに長くなりその変化の仕方が 初期水分・凍結温度によって異なるこ とがわかった。Miller¹⁰は、凍結面付 近に、土粒子、氷、液状水、空気が共 存する frozen fringe と呼ばれる領域 を考えることによって、凍上機構を説 明している。本実験における F.F 領 域は、この fronzen fringe と何らか の密接かつ重要な関係にあるものと思 われる。

IV. おわりに

本実験の特徴は、土壌の上表面を開 放にした系で、上表面のみを冷却する ことにより圃場の凍結現象に近い状態 を実験室内で再現し、不飽和砂壌土の 凍結に伴う水分・溶質・温度分布の変 化を同時に測定したことである。その 結果明らかになった点は、土の凍結過 程では水分・溶質・温度分布が相互に

関係しながら変化し、それらの分布が初期水分・凍結 温度によって異なることである。このことは、土の凍結 過程における水分移動は溶質および熱との同時輸送現象 として考えねばならないことを示唆している。また、凍 結時の温度分布に3領域が存在することを明らかにでき たことは、本実験の重要な成果である。土の凍結過程で の水分・溶質・熱の移動機構を理解するためには、今後 この領域分布を解明すること、とくに F.F 領域で生じ ている現象と液状水から氷への相変化との関係を解明す ることが重要であろうと思われる。

謝辞本実験は東京大学農学部井本博美技官の協力によって行った。同大学雨宮悠助手,岩手大学農学部藤井克 己講師,山形大学農学部石田朋靖助手には多大な助言をいただいた。また農業土木試験場農地整備第1研究室岩田進午博士には貴重な助言を賜った。ここに厚く識意を表する。

引用文献

 Dirksen, C. and Miller, R. D.: Closed-system freezing of unsaturated soil, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 30, pp. 168~ 172 (1966)

- Hoekstra, P.: Moisture movement to a freezing front, Extract of "Geochemistry, Precipitation, Evaporation, Soil-moisture, Hydrometry", General Assembly of Bern, Sept.-Oct., pp. 411~417 (1967)
- Harlan, [R.L.: Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil, Water Resour. Res., 9, pp. 1314 ~1323 (1973)
- 4) Cary, J. W., Papendick, R. I. and Campbell, G. S.: Water and salt movement in unsaturated frozen soil: Principles and field observations, Soil Sci. Soc. Am. J., 43, pp. 3~85 (1979)
- Iwata, S.: Driving force for water migration in frozen clayey soil, Soil Sci. Plant Nutr., 26, pp.215~227 (1980)
- 6)石田朋靖:土壌-植物系における水分 移動 に関する研究,東京大学博 士論文(1984)
- 7) 高志勤ら:凍土内アイスレンズの消長と移動に関する室内実験,雪氷

45 (4), pp. 189~196 (1983)

- 8) Jame, Y. W. and Norum, D. I.: Heat and mass transfer in freezing unsaturated soil in a closed system, Proc., 2nd Conference on Soil Water Problems in Cold Regions, Edmonton, 2Alta., pp. 46~62 (1976)
- 9) Fukuda, M., Orhum, A. and Luthin, J. N.: Experimental studies of coupled heat and mass transfer in soils during freezing, Cold Regions Science and Technology pp. 223~232 (1980)
- Miller, R. D.: Freezing phenomena in soils, Application of soil physics, ed by Hillel, D., Academic Press. pp. 254 ~299 (1980)

[1984.11.26 受稿]

[この論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000字以内, 編集委員会あ て) は、1986年10月25日まで受付けます。]

農業土木学会論文集 第122号 論文紹介

評価者集団の特質を考慮した用地分級手法の事例的考察

石田 憲治・西口 猛・高橋 强

本研究は,評価者の特質による評価視点の相違を明ら かにするとともに,分級目的に応じた評価者集団の選定 による新しい用地分級手法の開発をねらいとして実施し た。

農家は多くの条件を総合的に勘案して農地を評価するのに対して、非農家は農地のまとまりなど特定の要因に偏重した評価を行う。また、農家は既存集落周辺の集落用地適性を高く評価し、非農家は駅距離を重視する傾向がある。 (農土論集 122 pp.1~9) キーワード 土地分級、土地利用計画、農業生産基盤整備計

画,居住環境,土地評価,土地資源,標本,多変 量解析

加古川西部地区溜池群の貯水量変動特性

藤井 秀人・南 勲

兵庫県加古川西部地区溜池群を対象に,四つの代表溜 池を選び,水管理実態の聞き取り調査,貯水量の実測調 査を行った。その結果,①放流量は生育過程別用水量に 対応したトレンド成分と有効雨量の影響を受ける変動成 分からなること,②年間貯水量変動はバターン化できる こと,③潅漑期の降雨特性と貯水量変動の関係,④渇水 に対する溜池強弱指標と潅漑期末貯水量の対応状況など について明らかにした。

	(農	土論集 1	22 pp.	. 19~28)
キーワード	農業用水計画, 確率降雨	貯水池容量,	水管理,	相関係数,

移動平均雨量合成法による低水流量解析に関する研究

戸原 義男・加藤 治

移動平均雨量による河川の低水流量解析法 を 提 案 し た。河川の減水特性が線形 4 段タンクで表現できるとす れば各タンクからの出力は指数関数の和で表される。指 数関数の減衰は時定数 T を 用 いて (1-t/T) で近似で きる。これはT 日移動平均雨量の特性であることからタ ンク k の流出が T_k 日移動平均雨量に比例することを利 用した低水流量解析法を述べた。比例定数は流量を線形 化した後,重回帰式により偏回帰係数で与え,問題点を 検討した。

> (農土論集 122 pp. 39~47) キーワード 水源計画,水資源,重相関回帰分析法,移動平 均,低水流出,タンクモデル

不飽和土の凍結における水分・溶質・温度分布の変化

溝口 勝・中野 政詩・白井 清恒

土壤の上面を開放にした系で,上面のみを冷却するこ とにより圃場での凍結現象に近い状態を実験室内で再現 し,不飽和砂壌土の凍結に伴う水分・溶質・温度分布の 変化を測定した。その結果,土の凍結では水分・溶質・ 温度分布が相互に関係しながら変化し,それらの変化が 初期水分・凍結温度によって異なること,および凍結時 の温度分布に3領域が存在することが明らかになった。

> (農土論集 122 pp.11~17) キーワード 熱学・熱力学,地温,砂壌土,土壌の物理性,土 増水,含水比,電気伝導度

二層密度流における界面混合に関する研究

伴 道一・南 勲

二層密度流における渦拡散型の界面混合現象について 実験的・理論的に考察した。上下層が異なる方向に流動 する時の界面混合量は二次元移流拡散方程式に基づき乱 流拡散輸送量と連行型の移流運送量とに分離される。無 次元乱流拡散流束は断面リチャードソン数のみによって 決定され,無次元移流流束の方向とその大きさは各層の 安定の強弱の程度と流速の大小関係を表現するパラメー タに支配されている事が実験的に確認された。

> (農土論集 122 pp. 29~37) キーワード 開水路, 浮力, 乱流, 密度流, 無次元量

> > 内部界面波に関する基礎的研究

乃万 俊文・岡重 文久・佐々木安聖

内部界面波発生のため開発した造波機の特性および一 様水深下を進行する内部界面波の波高減衰について述べ る。

造波機構は密度界面に回転軸をもつ振動板でまず成層 に流れを発生させた後内部波となるもので、与えた運動 エネルギによって内部波エネルギが形成されるので、与 えた条件に対して発生する内部波諸元が求まる。波高減 衰は境界面,壁面,底面および流体内部での粘性逸散で 説明される。

> (農土論集 122 pp.49~55) キーワード 裁培漁業,漁場造成,密度流,微小振幅波,減 衰,粘性