

学位論文関係

博士論文要旨

氏 名 安部 征雄
学位の種類 農学博士
取得大学 筑波大学
取得年月日 昭和62年 2 月28日
論文課題 表層土における塩類集積の機構とその対策に関する実験的研究

論文の要旨

我が国の栽培施設の実面積は1981年現在3.5万 ha におよび、今後更に増加の傾向にある。その施設栽培では、多肥、集約栽培を伴う降雨遮断型環境に加えて施設の周年利用、大型化、固定化が進んでおり、塩類集積障害の恒常的発生をもたらす状況が作り出されている。我が国においてはこの問題に対する従来の研究は土壌肥科学、作物学、植物生理学等が中心であり、土壌物理学的観点に立脚した検討は比較的遅れているように思われる。しかし、問題の性質上物理的手法による検討は不可欠である。そこで、本論文では、塩類集積現象の機構から、集積の防止策、集積後の対策としてのリーチング特性、モデルハウスを造成しての実証実験、さらにリーチング後の課題としての水質問題までを一連のつながりを持つ研究対象と考え、個々の問題を明らかにするとともに個々との関連を考慮して対策の決定へと発展させていく方法を指向して研究を進めた。

各対象に関する主な研究成果は以下の通りである。

1. 土性が異なる供試土について、0.1%および0.45%の NaCl 溶液で飽和させ、乾燥過程における土層内での塩類集積に関するモデル実験を行なった。作物の水分区分からpF3.8を境に土壌溶液を分離して検討した結果、以下のことが明らかとなった。

1) 抽出土壌の濃度は表層で上昇し、その濃度上昇勾配は土性間で差がなかった。しかし、木節粘土含有量が多いほど、到達濃度は低く押えられ、この点からみれば作物障害の可能性を低下させる性質が強いことが考えられた。第2層以下の濃度変化はなかった。

2) 土壌懸濁溶液の濃度は、表層においては上昇し、第2層以下ではほとんど変化がなかった。表層の濃度は粘土含有量が多いほど同一水分蒸発において高濃度となり、この傾向は除塩の効率などを検討する場合などで重要な性質となることがわかった。

3) 乾燥の進行に伴い NaCl の絶対量は、抽出溶液については表層では漸増の後漸減し、第2層以下は漸減した。土壤懸濁溶液では表層で2次曲線的に増加したが、第2層以下は殆ど変化しなかった。これらから表層への NaCl の移動や、pF3.8を境とした NaCl の移動の様子を知ることができ、作物の水分利用の観点からの詳細な検討が進められる可能性が認められた。

2. 塩類集積現象をさらに正確に把握するため、供試体上部の集積層を特に細分割して実験を行ない、土性および土壤溶液濃度が異なる場合の集積層の形態とその変化特性とを検討した。主な検討結果をまとめると以下のようになる。

1) 集積層の到達深さは、粘土含有量が多い供試土ほど浅くなり、集積層内の濃度勾配は、乾燥が進むほど、また同一乾燥段階においては粘土含有量が多い供試土ほど急になる傾向がみられた。

2) 第1層の土壤懸濁溶液濃度は、蒸発水分量の増加に伴って2つの変曲点(A点、B点)をもって変化する。A点で濃度上昇勾配を表わす比例定数が大きくなり、B点以降では濃度は一定となった。A点の前後における比例定数の比は標準砂が最も大きく、粘土含有量がふえるほど小さくなった。

3) 第2層以深の集積層の集積は、A点に対する蒸発水分量までは進行し、それ以降は減退する形を示した。このことからこれらの集積は第1層から下層に分散した NaCl による間接集積が支配的であることが推測された。

4) A点が出現したときの各集積層の pF は1.9前後となり、供試土間、飽和溶液濃度間で差がなかった。この変曲点の水分保持程度は圃場含水量に近く、施設栽培の作物などでは灌漑開始を決定する点に近いので、重要な意味を持つ点であることが明らかになった。

3. 塩類集積過程において土壤表層付近に集積した塩類はその形態、量、挙動によって乾燥特性に大きな影響を及ぼす。そこで土壤溶液濃度、土性および乾燥温度が異なる場合の乾燥速度曲線の変化特性を比較した。主な検討結果は以下のとおりである。

1) 溶液型の乾燥速度曲線は、予熱期間を除く全過程で減率乾燥となり、その曲線は4本の直線で近似でき、その結果3個の屈曲点を有することが明らかになった。

2) 乾燥速度曲線に対する影響は、粘土含有量が多い供試土ほど高含水比側に位置し、乾燥温度が高いほど縦長となり、飽和溶液濃度が高いほど扁平になる型で現われた。

3) 乾燥速度曲線の屈曲点Ⅰは集積塩類が結晶化し始める点に当り、屈曲点Ⅱの乾燥速度は土壌溶液濃度が高いほど低下し、それが集積塩類による間隙閉塞効果のためと考えられた。これらの乾燥速度の差は灌水量や蒸発量に影響を及ぼすことが明らかになった。

4. 4種類の供試土に対して塩類の集積量と乾燥レベルが異なる供試体を作成し、それに対して湛水希塩水によるリーチングを行なった場合のリーチング過程および終了後の諸特性について検討した。その主な結果は以の通りである。

1) 排出溶液の量と濃度との関係を表わすQ-C曲線は乾燥レベルの違いにより三つのタイプに分類できた。初期濃度が維持され排出する定濃度排出と曲線がピークを形成するときの濃度および排出量等について土性、飽和溶液濃度および乾燥レベルの相異に基づく一定の傾向が把

握された。

2) 各レベルにおいて供試体中に残存する溶液量と定濃度排出溶液量との差が各供試土において等しくなることから、リーチングの溶液移動現象について検討できる可能性が認められた。

3) ピーク濃度は土壌表層の NaCl 集積量に加え、集積塩類が溶液か結晶かなどの形態やリーチング溶液がカラム内を浸透する速さなどにより決まり、粘土供試土では分散粘土の挙動が影響していることが認められた。

4) 排出量からみたリーチング効率是一般的には乾燥レベルが高いほど良く、粘土含有量が多いほどレベル間の差が小さくなることが認められた。また、リーチング必要量を用いたリーチング効率の検討に結びつける工夫が必要であることが考えられた。

5. 実証実験として砂質ハウス土壌で弱塩水を灌漑してピーマン栽培を行なった場合、灌漑方式、灌漑水質、灌水の位置関係および施設の方法などの相異が塩類集積およびリーチング特性に及ぼす影響を検討した。主な検討結果は以下の通りである。

1) 弱塩水灌漑による塩類濃度の上昇は、表層において最も著しく、また20cmまでの層においても認められた。土壌中のEC分布曲線は、全般的に、ドリップ区が散水区より、灌水の中間点が灌水落下点より、追肥区が無追肥区より高濃度側に位置する関係が認められた。

2) 灌水の落下点では塩類の集積、洗脱が繰り返され、収支的には集積が優勢となるためECの上昇が起こり、一方、中間点においては洗脱が起こりにくいので集積が落下点より進行しやすいことが明らかになった。

3) 追肥区の表層のECは経時的に高くなり、その上昇に追肥が大きく寄与していることが明らかになった。また、追肥の種類を選択すれば、EC上昇を押えることが可能であることが認められた。

以上までの各項で明らかになった塩類集積過程における乾燥特性、集積塩類のリーチング特性およびモデルハウスにおける実証実験等の結果から、塩類集積とそれに係わる諸現象への対応やそれらに対する対策に関する今後の展望として以下のことが考えられる。

塩類集積の機構に関しては、まず、植物との関係を重視した検討を進める必要があると考えられる。土壌水を初期萎凋点のpF3.8を境に分離したことによって、作物の水分利用の観点からのさらに詳しい検討が進められる可能性がみられたが、作物に影響を及ぼすにいたる経緯としてのpF3.8を境とした溶液間の溶質移動の機構を明らかにする必要がある。また、集積は表層付近に集中し、下層では土壌溶液濃度が上昇しない層が存続するので、作物の根群域を安全な層に発達させたり、表層よりわずかに深いから灌水したりする方法が工夫できると考えられる。

集積層の形態として、表層における蒸発水分量に対する濃度上昇勾配が変化して大きくなるA点とその平均含水比の前後における第2層以下の濃度変化傾向を確認したことが塩類集積の機構を解明する上で重要な意味を持つと考えられる。また、Aが出現するときの集積層の水分保持レベルがpF1.9前後で、施設栽培において灌水の開始を決定する点に近いので、塩類の集積量をコントロールする方法に役立つと考えられる。

土壌水が溶液である場合の乾燥特性曲線からは、曲線の屈曲点ⅠおよびⅡにおける乾燥速度が溶液濃度が高くなるほど比例的に低下していくことから、溶液濃度ごとの蒸発量の正確な把握をして、灌水時期や灌水量を決定しなければならないことがいえる。

土性、飽和溶液濃度および乾燥レベル（塩類集積量ともいえる）が異なる供試体に対する湛水希塩水によるリーチング特性からは、まず、リーチング過程におけるリーチング溶液の挙動について土壌間隙の形態と流動溶液の性状との関係などからの検討が必要であるといえる。また、集積塩類の形態や分散粘土の挙動はリーチング効率に大きく影響を及ぼすので、効率を高めるためにそれらの特性をさらに本目細かく検討していくことが必要である。さらに、本研究で得られた結果を圃場などへのより広範な対象に適用するためには、リーチング必要量の考えなどに結び付ける工夫が必要である。

モデルハウス内での実証調査からは、現場においては、実験室内ではコントロールできた要因も制御できない要因として入り込み、それが変動し、それらの総合的な結果として現象が示されるので、その意味の解釈には多くの蓄積された知見が必要であることがいえる。

以上指摘した個々の課題についてさらに詳細な実験と検討を行い、現象の解明とそれらに対する対策を確立して行かなければならないが、本論文では塩類集積の機構のみではなく、集積の防止策、集積した塩類のリーチング特性と効率的除去法、リーチング後の排出溶液の対応等を一連の流れの中でとらえ、ある程度全体を把握した上で、各ケースの問題解決において、どの段階をどのようにするかによって生じる効果および全体への影響を把握し、手をつけるべき優先順位の決定を行なう方法を模索することが必要である。この観点に立てば、塩類集積問題は集積した塩類をリーチングなどで作物栽培に関与する土層から排除した後の問題、すなわち地下水や農業用水の水質汚染の問題まで含めて考えなければならない。このような水質問題との関連から、除塩後の問題解決に繋げていくために、農業用水の水質汚濁の予測法やその浄化法等について、別に研究を行ってきた。その中で接触酸化水路を用いた農業用水の簡易浄化法は、有機物や肥料などが雑多に含まれた土壌にリーチングを行なった場合において排出される溶液の処理などには適用できると考えられる。なぜならば、有物を土中に還元して、その有効利用により地力維持を図ろうとする場合の農地では、有機物自体に含まれた雑多な物質や有機物の分解過程に生成される物質等が土壌水の移動に伴って移動し、集積し、除去される状態が作り出されるからである。また、田畑輪換などによる汎用化農地などでは、農地の乾湿の繰返しの要因が加わることによって、土壌中の分解が活発になり、有機物も肥料分を含んだ土壌溶液が作土層から排出されて地下水や農業用水などへ流入する状況も考えられる。接触酸化水路法は微生物の吸着や酸化作用を利用した、いわゆる好氣的処理に属するので、対有機物処理のニュアンスが強いが、実際の圃場で起きる問題は、むしろ限定された原因であることが希であり、一般的には複数の原因を持ち、それらへのより効果な対応が問われる。そのことからすれば、土壌中の可溶性塩類と有機物との関係は最も切り離して考えにくい要因であると考えられる。したがって、両要因を結び付けて対策を立てていくことは現実的であると考えられる。

最後に、本論文は主に施設内土壌を想定して進めてきたが、この結果を基として、現在大き

な問題として世界的にクロズアップされつつある乾燥地農業への取組みに発展させたいと考える。

氏 名 天田高白
学位の種類 農学博士
取得大学 京都大学
取得年月日 昭和62年 3 月23日
論文題目 山地河川における土砂流出予測に関する研究
- 雨畑川における土砂移動について -

論文の要旨

この研究は流域管理の視点から雨畑川を事例として土砂移動機構に関する研究を行ったものである。

第1章で論じたように筆者は土砂流出現象を論ずる際、対象とする問題によっひて、長期(年)短期(1出水)といった時間スケールを変えたとらえ方が必要であるとの考えに立ち、地形のもつ土砂貯留効果に着目して研究を進めた。すなはち貯水ダムの堆砂や河床の低下、上昇といった長期間の土砂流出が問題となる場合にはたとえば年平均流砂量を予測することで、土石流や掃流により短期間に一挙に多量の土砂を流出、氾濫する現象に対しては最大流砂量の予測が必要である。流域一貫した砂防計画を立てるにあたり、両者は共に重要な対象土砂量でありその適正な予測法の確立が求められている。

また山地河川は急勾配で河幅の広狭変化が著しく特に狹窄部周辺では流量の増減あるいは流量規模に対し常流射流の異なった流れかたをする。このことは土砂流出における地形の影響が平地河川に較べはるかに大きく、出水時の土砂貯留効果が大きいことを示している。

筆者は第2章で年流出土砂量の予測について論じた。粒度範囲が広く境界条件の複雑な山地河川では、従来提案されてきた流砂量式を用いて、全く理論的に流砂量を予測することは困難であり、実用的推定式として、現論および実験式に共通する $\phi_T = f(r_*)$ の関係から流砂量を流量で表示するモデル式を誘導した。 ϕ_T は r_* が0.05付近から急激に増大し、ある程度以上になると r_* のべき乗で近似されることが知られている。すなわち

$$\phi_T \propto r_*^a \quad (\phi_T = Q_T / B \sqrt{s \cdot d^3})$$

全流砂量 Q_T は

$$Q_T = \alpha (Q I_e)^{\frac{3}{2}+a} \quad (1)$$

また現在までに報告されている実験式、実測値から $a=5/2$ 程度であることから、結局全流砂量は $5/3$ に比例することを示した。

一方、雨畑ダムの年間堆砂量と水文量の関連解析を行い、日平均流量 q_{mi} と堆砂量の関係を

$$Vs = 86400k \sum q_{mi}^n \quad (2)$$

で表わし、実測値と計算値の残差平方和を最小にする係数 n が1.7となり先に導いた式の5/3に近い値となることを示した。また年最大日雨量と堆砂量の関係は2群に分かれ、相関係数はどちらも0.93を超える値を示すがこの回帰線を交互に各年で移動することで、河道の貯留効果の表れとも考えられる。

流量については年最大洪水ピーク流量と堆砂量の関係が日平均流量と比べて相関もよく、実測値と計算値の差が小さい。水文量は上位であるもの程一般に相関も高くダム堆砂は豪雨時に貯水池に流入する土砂量が主であることがわかり、長期（年流砂量）の算出においても短時間土砂流出量を考慮すべきことが明らかとなった。（図-1）。

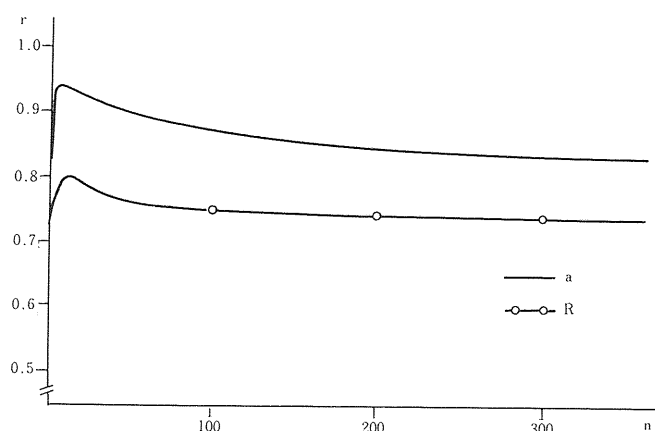


図-1 順位日平均流量、日雨量と堆砂量の相関

また第3章で河道の貯留効果について7820台風、8210,8218台風後の河床変動状況の観察及び解析から湾曲拡幅部の貯留効果が大きいことが示された。

この河道地形の有する貯留機能を検討するための水路実験を行い堆砂は出口狹窄部によるせきあげ背水による跳水位置から始まり、プールがほぼ完全にうめられた後、排砂量が増大することが判明した。また跳水の発生がない場合はほとんどの流入土砂が実験条件範囲内では通過した。

さらに掃流力と流砂量の関係は水路内を上流、下流、出口付近の3区間に分け $\tau_* - \phi_B$ 関係図から下流側が上流側より同一流砂量に対し流水抵抗が大きいことが予想された。

また下流側で水路側壁に溝が出来ていて2次流が発生しており流砂がみられないのに溝の部分を計算に含むことになりその抵抗を別々に議論することは困難である。すなわち水路縮小部については流れが2次的挙動をしており、1次元取的扱いをする場合 R 及び I_e の与え方に工夫が必要である。実験では第4章で詳述するように有効水深を与え抵抗値に相当する芦田、高橋、水山式の係数を8前後に修正して現象を説明することができた。この値は合理的な値とい

える。

また実験時貯留効果を説明するために1次元河床変動シミュレーションを行った(図-2)。

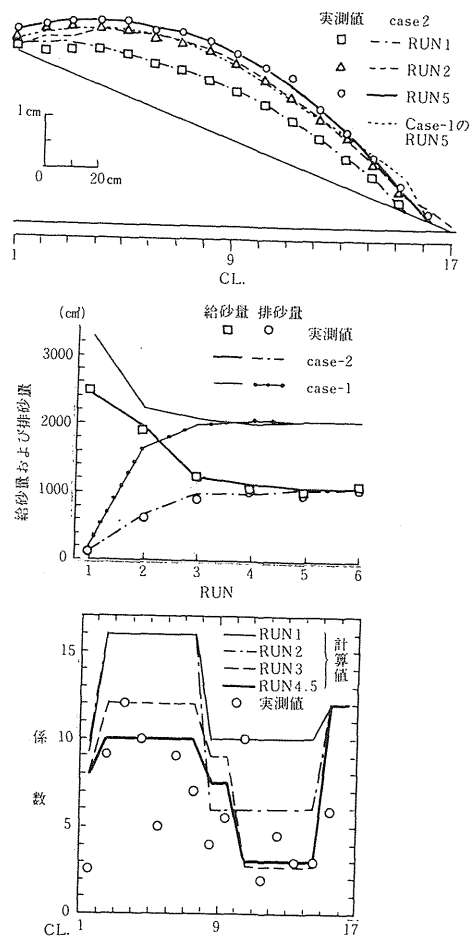


図-2 シミュレーション結果と実測値(A-5実験)

その結果出口付近は上流側と比べ抵抗を大きくすることが必要で、また堆砂の進行過程に伴って抵抗を増大させることが必要であった。第5章で第4章から誘導される踏留効果を考慮した土砂流出予測手法を示し実際河川に適用した。その結果、貯留効果を考慮して芦田、高橋、水山式を用いることにより8210台風による出水後の河床変動をよく説明することができることを示した。今後の問題点として、流れが2次元的挙動を示し付加的な抵抗の生ずる縮少部において1次元の取扱いをする場合、 R 及び I_e の与え方等に検討すべき問題点が残されている。

また今回は雨畑川での事例について考察したが、他の河川での同様な検討をおこなうことが必要である。

氏 名 杉山 博信

学位の種類 農学博士

取得大学 東京大学

取得年月日 昭和62年11月9日

論文題目 表面流特性を基礎とした貯留関数型モデルの汎用化に関する研究

Study on the Synthesis of the Storage Function Model on the Basis of Overland Flow Characteristics

Summary

This study aims to clarify the physical and statistical characteristics of parameters of the storage function model which is one of the representative flood runoff models in Japan, and to synthesize the storage function model considering the watershed characteristics in order to enhance the applicability of the model to the distributed style.

The contents of this study are summarized as follows:

Chapter 1 describes the background of this study. The development and/or land-use change of a watershed such as urbanization is being accelerated in many places in Japan, recently. Although the establishment of the methodology for predicting runoff changes due to land development is of urgent necessity, many problems on structure and/or parameters of the runoff model are left unsolved yet. As an approach to these problems, the author intends to examine the physical and statistical characteristics of parameters of the storage function model, and then, to expand the applicability of this model to a watershed with various land use conditions.

Chapter 2 deals with an experimental study on the flow regimes, putting emphasis upon the resistance law of shallow water flow on the slope, in order to give a basis of discussions on the construction of the runoff model and the meaning of model parameters in the following chapters.

Namely, the experiments assuming various runoff phenomena are made on the slope surfaces of four types, a smooth surface, an uneven surface, an artificial turf and a gravel layer, under the condition of a constant rainfall or a steady inflow. The results are summarized as follows:

- 1) The flow through a partial water path over a smooth surface is a laminar flow. However, if the water depth of the flow is evaluated by the equivalent depth, which is defined as the depth for the thin sheet flow all over the slope, the flow is regarded as a turbulent flow.
- 2) The flow over an uneven surface is also regarded as a laminar flow for the depth averaged simply over the slope. However, the flow must be considered as a turbulent flow for the effective depth which is defined as subtraction of depression and/or wedge storage from the actual depth.
- 3) The high flow on a turf surface is a laminar flow, but the Darcy law is applicable to a low flow lower than the height of the turf and the Manning law to the exceeded flow over the top of the turf.
- 4) The flow in a gravel layer is also regarded as a Darcy flow.
- 5) The effect of depression and/or wedge storage must be taken into consideration for the analysis of runoff from a slope, except the case of smooth surface.

In chapter 3, the author discusses the meaning of parameters of the kinematic runoff model and that of the storage function model, from the viewpoints of quasi-hydraulics and/or physical-hydrology.

The equation, $h=kq^p$, is generally used in the kinematic runoff model to express the relation between depth, h , and discharge, q , of a two-dimensional overland flow. An exponent p of this equation has hitherto been believed to be governed by the state of flow such as $p=1/3$ for laminar flow and $p=3/5$ for turbulent flow. The foregoing conception is fundamentally the same as in the storage function model.

However, the two-dimensional overland flow is a hypothetical flow obtained by modeling the actual rainwater flows along rills. Therefore, the value of p is considered to be different naturally from those for a laminar or turbulent flow.

First, the sectional characteristics of rills in the natural slope are investigated in detail. Next, how the depth-discharge relation changes is examined when a shallow flow of laminar or turbulent state along the rill over a slope surface is transformed into a imaginal sheet plane flow over the full-width of the rill or the whole-width of the slope surface under a given rate of rainfall.

As a result, it was disclosed that the value of p varies outwardly from $1/3$ to $0.40\sim 0.53$ for laminar flow and from $3/5$ to $0.67\sim 0.75$ for turbulent flow, and that we may assume $p=0.5\sim 0.7\approx 0.6$ from the view point of engineering practice.

The foregoing results seem to support the hypothesis that the flow over a slope is regarded as the Manning flow. However, it was clarified that the contents mentioned above differs quite from the description which has ever been recognized for the flow regimes

over a slope.

Chapter 4 treats the effect of land use conditions on flood runoff characteristics, and moreover, the possibility of the simplification of the watershed model for applying the kinematic runoff model. In this study, the author uses the flood data observed during almost five years in the experimental basin including three plots of woodlands (0.072km²), golflinks (0.037km²), and a playground (0.074km²), and examines the flood runoff characteristics in each sub-basin comparatively, such as the time of flood concentration, the coefficient of peak runoff, and the equivalent roughness of the kinematic runoff model.

The results are summarized as follows:

- 1) In applying the kinematic runoff model, the watershed is able to be simplified to 1 or 2 blocks. This result suggests that the storage function model, which is the lumped type fundamentally, can be used as the distributed type like the kinematic runoff model.
- 2) By the change of land use from woodlands to golflinks, a baseball ground or a playground, the concentration time is reduced to $3/4 \sim 1/2$, and the coefficient of peak runoff increases several times.
- 3) The rainwater flow over a slope is able to be simulated by applying the kinematic runoff model of the Manning type to any land use.
- 4) The optimal value of the equivalent roughness ($m^{-1/3} \cdot s$) is as follows:

1.0	for woodlands,	0.2~0.3	for golflinks
0.3~0.5	for upland fields,	0.03~0.05	for a playground
0.1	for housing areas including bare and grassy lands.		

In chapter 5, the author examines, quasi-theoretically and/or statistically, the meaning and characteristics of parameters of the storage function model defined by the following equations,

$$S_t = KQ^P, S_t = \int_0^{t-T_t} r_e dt - \int_0^t Q dt$$

In which, S_t is the hypothetical storage depth of rainwater over a watershed considering the time lag T_t between rainfall excess r_e and flood runoff discharge Q .

First, the parameters of the storage function model are discussed quasi-theoretically by utilizing the equational analogy between the storage function model and the kinematic runoff model. Next, the optimal parameters for 89 floods in the 22 watersheds with various land use are identified by applying a mathematical optimization technique in order to examine the statistical characteristics of these parameters.

The results obtained are as follows:

- 1) The meaning of the parameter P in the storage function model is equivalent to that of

the parameter p representing flow regimes over a slope in the kinematic runoff model. The optimal value of the parameter P varies widely in $0.4\sim 0.8$, but most are in the range of $0.5\sim 0.7$, so that the parameter P is allowed to be fixed at 0.6 .

This fact supports the results which are theoretically discussed in chapter 3.

2) The parameter $K(\text{mm-h unit})$ is expressed by the parameter $k(\text{m-s unit})$ in the kinematic runoff model and the basin area $A(\text{km}^2)$, as follows:

$$K = 2.5kA^{0.24}$$

3) The expression of the lag time $T_l(\text{h})$ is shown with the parameter $k(\text{mm-h unit})$, the basin area $A(\text{km}^2)$, and the effective rainfall $r_e(\text{mm/h})$.

$$\text{Mountainous area:} \quad T_l = 0.5kA^{0.24}r_e^{-0.4}$$

$$\text{Developing and/or urbanized area:} \quad T_l = 2.2kA^{0.24}r_e^{-0.4}$$

These expressions have the merit in that people can use the standard values for the k classified according to land use conditions. On the other hand, this would be a demerit in that the parameter k and the lag time T_l must be decided by the parameter k in the kinematic runoff model.

In Chapter 6, the author proposes and verifies simplified expressions for estimating the parameters in the storage function model in view of geomorphology in a watershed, and moreover proposes the method to use these expressions as the distributed model, and lastly examines the validity of its method and the expressions.

The simplified expressions for the parameters in the storage function model are as follows.

1) $P=0.6$

2) $K = \beta A^{0.14}$

$$\text{Mountainous area:} \quad \beta = 5$$

$$\text{Developing and/or semi-urbanized area:} \quad = 1$$

$$\text{Urbanized area:} \quad = 0.5$$

3) $T_l = \gamma A^{0.14}r_e^{-0.4}$

$$\text{Mountainous area:} \quad \gamma = 1$$

$$\text{Developing and/or semi-urbanized area:} \quad = 1$$

$$\text{Urbanized area:} \quad = 0.5$$

In the above equation, K : mm-h unit , T_l : h unit , A : watershed area (km^2), r_e : effective rainfall intensity (mm/h).

In this study, the author aimed at examining the meaning of parameters in the storage function model physically or statistically, and establishing the practical and rational method to apply the storage function model to the watersheds with various land use conditions.

First, the author experimentally examined the flow regimes for a flow over the slope. Next, considering the experimental results, the author discussed the characteristics of

parameters in the storage function model, and derived the equations for estimating the model parameters geomorphologically. This is the proposal of the synthetic storage function model. Lastly, the author described the applicability and adaptability of the proposed synthetic storage function model.

The author believes that, although the proposed equations could be modified by using many reliable flood data in the future, the estimated value by the proposed equations would have only minor discrepancy with one by modified forms, if any.

氏 名	眞板秀二
学位の種類	農学博士
取得大学	北海道大学
取得年月日	昭和62年 6 月30日
論文題目	破碎帯流域における荒廃溪流の動態に関する砂防学的研究

論文の要旨

本論文は、災害の素因ともいべき厳しい地形・地質条件下の破碎帯流域を対象にし、その自然的、社会的特性を明らかにするとともに、山腹から河道に至る土砂移動や、ダムなどの人為的介入による堆積現象などを時系列的に検討することにより、破碎帯流域の保全について考察したものである。

1章では、まず、破碎帯流域の特性およびその保全上の問題点を述べ、貯水ダムの保全が特徴的であることを示した。つぎに、研究の対象として選んだ大井川は、破碎帯流域の特徴を典型的に持つモデル的な流域であることを述べた。さらに、研究の基本的立場を、“土砂移動現象は、空間における時系列変化として把握されなければならない”という点に置き、具体的には、つぎのような方法をとったことを述べた。①流域全体の土砂移動現象の把握には、貯水池群を野外の実験装置と捉え、貯水池堆砂量を年単位で分析する。②土砂移動過程の解明には、実際溪流を野外実験の場と捉え、洪水ごとの溪床変動を把握する。また、③土砂が移動（洗掘）するか、堆積するかは、供給される土砂と水の量それに河道の土砂輸送能力によって決まるという立場から、流量との関連で土砂移動現象を解析する。

2章では、流域全体の巨視的な土砂移動の特性について調べた。この結果、以下の点が明らかになった。①大井川流域の平均年比流砂量は、2千～6千（ $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ ）の値を示し、わが国でも最も土砂の生産・流出の活発な地域である。②上流域の土砂収支を行うと、井川ダム地点より上流では、年間約208万 m^3 以上の土砂が生産・流出し、約192万 m^3 が井川ダムをはじめとする3つの貯水池に堆砂する。下流に流出するのは、わずか16万 m^3 であり、貯ダム

が下流への供給土砂の大半をカットし、その影響力は極めて大きい。③巨視的な土砂移動現象の解析により、降雨（流量）規模と土砂移動規模が必ずしも対応しないことがわかった。これには、移動可能土砂量が重要な役割を果たしていることが示唆された。

3章では、2章で示唆された土砂移動現象の特徴を詳細に検討するため、実験渓流における土砂移動の実態について調べた。この結果、以下の点が明らかになった。①1979年～1985年にかけて9回の溪床変動が確認され、日雨量がほぼ150mm、一連続雨量がほぼ200mm、最大時間雨量が20～30mm（1.3～1.5年確率雨量）を越すと溪床変動が発生する。②8208洪水は、これまでの溪床を数mから数8mにわたって上昇させる大規模な変動をもたらした。この後、洗掘過程に入り、溪床はダイナミックに変化し、縦・横断面形、平面形および流路形態は元に戻ろうとする傾向が見られた。この中で、縦断面形、特に谷底線が最も早く元の形態に近づいた。③8208洪水の堆積物構造を調べると、礫の並びが揃った層状構造がみられ、掃流による堆積環境であったことを示している。しかし、層状構造の中には堆積ユニットがいくつも見られ、一回の洪水でも流水の営力は、何回もピークを持つことを示している。この層状構造は、溪床の上昇とともに水位が上昇することにより形成されたものと推定された

4章では、溪床へ土砂を供給する側の山腹における土砂移動プロセスを調べた。この結果、以下の点が明らかになった。①崩壊地における主要な岩屑の移動・堆積プロセスとして rock fall、乾燥岩屑流、岩屑流が指摘され、可動性物質の集積という点では、rock fall が特に重要ということになった。また、可動性物質の下方移動という点では、岩屑流が rock fall、乾燥岩屑流と巧みに連携して重要な役割を果たしている。② rock fall によって生産された岩屑量は、年平均崩落深として $10^{-1} \sim 10^1$ mmのオーダーであった。東河内流域で試算してみると数十年間で数千～数十万 m^3 という値が得られた。流域全体の土砂生産源である上流部は、さらに rock fall が起こり易い条件下にあることを考えると、土砂生産という意味からも rock fall は、無視できないものである。③8208洪水の土砂生産の状態から判断して、土砂生産のためには可動性物質が集積されていることが必要条件で、豪雨があっても可動性物質が集積されていなければ、土砂生産は行われない。この可動動物質の集積に rock fall が重要な役割を果たしている。

5章では、流量情報を入れて溪床変動を洪水時系列で解析した。この結果、以下の点が明らかになった。①従来の溪床変動量の概念では、溪床の場の変動を十分に把握できないことを示し、このためには、溪床変動に係わった土砂の総量を指標する溪床変動総量の概念が必要なことを指摘した。②降雨（流量）確率と土砂移動規模の確率は1対1に対応しない。③8208洪水後の洗掘過程では、単位流量当りの溪床変動量が指数関数的に減少するという規則性がみられた。④溪流においても流量（ Q ）と流路幅（ B ）に関する水理幾何学関係（ $B=rQ^b$ ）がある程度成立した。

6章では、これまでの検討を踏まえて、溪流の動態認識を述べるとともに土砂の流出モデルについて考えた。①溪流の自然河道には自己調整作用が働いている。これは、大規模な堆積が河道の安定を乱す攪乱要素となり、その後の洗掘過程で河道自身がその勾配、幅などの形状

を調整することにより、安定な河道への到達を指向するというものである。谷幅の狭い部分は、河道自身の形状調整能力が小さい“遊び”の少ない空間、広い部分は形状調整能力が大きい“遊び”の多い空間である。②溪床堆積土砂の安定化のプロセスを水理量との関連で直接評価した。この方法によっても、大規模堆積後の溪床面は極めて不安定な状態にあると判定された。その後洗掘過程で、溪床面が段丘状化し、その段丘状堆積物が洗掘を免れれば免れるほど、安定化した。これは、同一の土砂であるにもかかわらず、再移動し難くなるという質的变化を遂げているということであった。③土砂の流出モデルは $S(t) = -\alpha e^{-\beta t}$ のように表された。また、堆積規模あるいは谷幅の広狭による係数 α 、 β の変化について調べた。流出モデルを溪床土砂堆積量推移のパターンで示し、拡幅部の有無による下流への土砂流出の時系列変化を検討した。この結果、拡幅部は、生産域で起こった土砂生産を緩和し、下流での溪床変動を小さくし、土砂生産に対する反応時間を長期化させることが明らかになった。

7章では、河道調節機能を取り上げ、破碎帯流域の砂防計画について考えた。①河道調節を“a)一時的に土砂を堆積させる作用（その量が河道調節量）、b)その堆積土砂の下流に対する流出を小規模化（指数関数的に）、継続化させる作用”と新たに意味づけ、これまでのあいまいな概念を明確なものにした。②溪床土砂堆積量推移のパターンを使って、谷幅の広狭、堆積規模などの違いによる河道調節の違いを検討した。この結果、谷幅の広いほど、また同一区間では堆積規模が大きいほど、河道調節の機能が大きかった。なお、この調節機能は、安定な状態のとき十分発揮され、そうでないときは、河道調節量は同じであっても、b)の作用が小さくなること、また河道の不安定さの程度によっては、当該の河道調節量より、直後の洗掘量が大きくなることもある。③拡幅部の数と土砂生産から流出に至る移動・堆積プロセスとの関係を検討した結果、多くの拡幅部を通過するほど、山腹で生産された土砂は小規模化された。④拡幅部は、そこからの土砂生産がある程度予測できること、土砂生産を事前にコントロールできることから土砂コントロールの場として最も適している。砂防施設は、拡幅部の河道調節機能を助長させるように配置されることに意義があり、この方法として床固工群が有効であることが明らかになった。また、床固工群の土砂抑制量について試算したところ、量的にみても有効な技術的方法であることがわかった。なお、破碎帯流域では、十数年～数十年に一度、床固工群が埋積するような土砂生産が起こる可能性がある。このため、十数年あるいは数十年という短い期間で現状を見直し計画を改変していくことが必要になってくる。

拡幅部群に床固工群を配置するという方法は、土地利用に高度化した下流扇状地部の防災にとって有効であるばかりでなく、残された自然環境を保ちながら貯水ダムの保全を計るという破碎帯流域に課せられた難題を解く可能性を持つ方法であるといえる。

〔昭和61年度・筑波大学農学博士（論文博士）〕

氏 名 山下 進

論文題目 ロックフィルダムの耐震設計に関する実験的研究

主査：岸上定男 副査：相原良安、沢口正俊（構造工学系）、鈴木光剛

論文の要旨

1)本研究の目的

わが国のような地震活動の活発なところでは、フィルダムは大地震により甚大な被害を受けることが多い。また、最近大ダムに築造例が多くなったロックフィルダムの設計技術は、経験的要素に基づくものが多く、力学的に十分解明されているわけではなく、具体的な設計法もない現況にあった。

本論文は、このような現状を通じて、表面遮水壁型ロックフィルダムの耐震性状に対して実験的研究を行い、実験的に具体的な設計手法を見出し、これを実際のダムに適用して、ダム断面を決定する。次に、このダムの安全性を理論・実験両面を通じて検証し、安全性と経済性をもつ設計技術の開発を行い、これによってロックフィルダムの計画・設計技術の発展に寄与する。

2)従来の研究と本研究の特徴

従来のフィルダムの斜面の安定解析法は、数値的解析法と実験的解析法に分けられるが、本論文は実験的解析法に入るものである。従来の数値解析法のうち滑り面法は、比較的近似値を与えるといわれ、現在農林水産省の設計基準でフィルダムの安定解析法として円形滑り面法が認められている。

しかし、アースダムは構成材料に内部摩擦角と粘着力をもっており、ロックフィルダムは粘着力をもたないという本質的な相違がある。従って、この円形滑り面法をロックフィルダムにまで適用することに大きな問題点がある。この点を解明し、「限界滑り面安定解析法」としてアースダムは対数曲線状の滑り面を、ロックフィルダムは直線状の滑り面を発生することを明らかにした。この事実を基礎に地震時のロックフィルダムの安定解析法（震度円安定解析法）を見出し、この手法を北海道で築造される双葉ダムの設計に適用し、理論・実験の両面より安全性を検証し満足する結果を得た。

3)本論文の各章の要約

第1章では、ロックフィルダムの耐震性の研究を行うのに必要な実験装置の計画、設計、製作と製作後の性能検定を述べる。すなわち、A型およびB型震動台を製作したが、両者とも製作後の性能検定では、加速度・変位等の実測値は設計の計算値と近似した値が得られ、要求される性能を十分満足していることを確認した。

第2章では、相似則を検討するために、A型およびB型振動台を使用し、粒径、縮尺、振動数を変えて検討した。次に模型ダムの振動性状を確認するために、振動台上に岩石材料で模型ダムを造り、それに振動を与え滑り破壊現象を発生させた。その結果、内部摩擦角のみの材料の模型ダムは、円形滑りを発生せず、表層の直線滑りになった。また、震度はダムの上部程増

加するので、上に凸のダム断面形状になり、この断面の形状を震度に対し数式に導いた。

次に、滑り破壊は、有限要素法による解析でも破壊領域が同一箇所に発生することを実証した。

第3章は、本論文の中心的課題であるフィルダムにおける限界滑り面安定解析法と、震度円安定解析法の理論について述べた。

まず、従来の円形滑り面法の矛盾点を補正するために、築堤材料に粘着力のあるアースダムの限界滑り面の(1)式を、また、粘着力のない材料からなるロックフィルダムの(2)式をともに理論的に誘導した。

$$x = h - (n-1)\tan\phi - a \cdot \log_e \frac{n}{\ell} \dots\dots\dots (1)$$

$$x = h - (n-1)\tan\phi \dots\dots\dots (2)$$

但し、 x : ダムの底面から斜面までの鉛直高さ (m)

h : ダムの堤高 (m)

n : ダムの底面の長さ (m)

ϕ : ダム材料の内部摩擦角 (度)

a : 土質によって異なる定数 (m)

ℓ : 単位長さ (m)

これにより、ロックフィルダムは直線滑りを発生し、アースダムは対数曲線状の滑り面を発生することが導かれた。

次に、耐震的に円形滑り面法に代わる方法として、ロックフィルダムの震度円安定解析法による耐震断面を求めた。すなわち、ロックの模型ダムに震動を与えると、最終的には上に凸の円弧状に落着く。この円弧を持つ円が震度円で、その円中に形成されるダムの耐震断面（設計断面）の勾配 β は $\beta = 0.4\theta$ （震度円角 θ ）と簡単な関数関係で求まる。安全率（Fs）は堤頂の動的安息角の正接を斜面勾配の正接で除した値である。

第4章では、限界滑り面安定解析法の検証を模型実験と実際の被害例によって行っている。

実験的には湿潤標準砂と乾燥標準砂を使用して円すい形に盛り立て、その斜面の限界勾配を見ることにより確認した。また、非粘着性材料で造った模型フィルダムに震動を与えて実験したところ、従来の考えであると当然起こるはずの円形滑りが内部に発生せず、表面の直線滑りが発生した。このように、ロックフィルダムに円形滑り面法を適用することの不合理性を確認した。

第5章では震度円法の考え方を使って双葉ロックフィルダムを設計した。

この際要求設計震度は0.15であるが、安全を見込んで0.18とし、zone 1～3に分け断面設計を行った。

この模型の検証実験を行った結果、ダム頂がくずれ始めた震度は0.18で設計値と一致し、十分安全であることを確認した。

この安定解析法は、農林水産省の土地改良事業計画基準に掲載されており、表面遮水壁型のロックフィルダムとして双葉ダム、深山ダム等に適用され、完工後十余年を経た現在、何ら異

常もなく安全に機能している。

〔昭和61年度・筑波大学農学博士（課程博士）〕

氏 名 柳 天仁

論文題目 木材の結露と菌類の発生およびその防止に関する研究

主査： 井上嘉幸 副査：青山経雄、相原良安、椿 啓介（生物科学系）

論文の要旨

本論文は、建築物の耐久上極めて重要な木材の結露と菌類の発生およびその防止に関し、今日までほとんど研究されていなかった結露を中心に、結露個所よりの菌類の分離と同定、屋外における結露と菌類の発生、走査電子顕微鏡による木材中の菌類の観察、木材の腐朽過程の観察、結露による木材の物理的性質の変化および防腐剤の浸透性と発育抑制など詳細な研究を行い、その結果、結露の発生機構と菌類の発生防止に必要な防腐剤の性能を明らかにした。すなわち、はじめに結露によって発生する菌類について、屋内および屋外より菌類を採取して同定を試み、つぎに、これらの菌類の木材中の動態を明らかにし、さらに、3種の樹種による結露発生を検討した。また、防腐剤の効力と浸透性を解明して、耐久性向上法の基礎を明らかにしたものである。

その概要は、つぎのとおりである。

1) 結露個所より分離した菌類の同定

住宅部品開発センター内の試験室などを用い、結露を起こさせた壁面から菌類を採取した。菌類の発生は露点温度以下の部位に発生し、合板に釘を打ち込んだ部分では著しい結露の発生が認められた。分離した菌株は238株で、細菌は3株、酵母は2株、真菌は233株であり、真菌では14属が同定され、*Cladosporium* 属18%、*Penicillium* 属15.9%、*Aspergillus* 属11.2%でこれらは検出頻度が大であった。屋外における結露と菌類の発生について、社寺の床下環境の条件と菌類の発生を調べた。土台の含水率は約40%、束石から10および20cm以上では繊維飽和点以上の含水率が認められた。3神社について、16属の菌類が分離同定され、そのうち、*Penicillium* 属および *Aspergillus* 属が最も多く、検出頻度はそれぞれ25.7%および16.3%であり、ついで *Cladosporium* 属9.7%、*Flusarium* 属7.7%および *Alternaria* 属7.3%であった。屋内では *Cladosporium* 属、屋外では *Penicillium* 属の多いことが認められた。

2) 走査電子顕微鏡による木材中の菌類の観察

はじめに培養基の相違による菌類の生育速度を比較した結果、*Rhizopus japonicus*、*Mucor racemosus* および *Trichoderma viride* の生育が良好で、生育の遅い菌種は、*Pestalotia* 属、*Phoma* 属、*Cladosporium cladosporioides* および *Aureobasidium pullulans* であった。つぎに、

スギおよびブナを腐朽させ、電子顕微鏡により腐朽状態を調べた。まず、重量減少率について、軟腐朽菌 *Chaetomium globosum* および *Tricho-derma viride* は *Acremonium* 属、*Mucor racemosus* および *Rhizopus japonicus* より大きな重量減少率を示した。また、スギについて、オオウズラタケの重量減少率がカワラタケよりも大きく、ブナ材の場合にはカワラタケの方がオオウズラタケより大きな重量減少率を示した。電子顕微鏡によると、スギの場合、穿孔の拡大による劣化が主体で、壁孔を貫通したカワラタケの菌糸にカスガイ連結の形成が認められた。

3) 結露による木材の物理的性質の変化

木材の結露と吸湿性の関係を調べた結果、ベイツガ、ブナ、バルサの順に吸湿性が小さく、また、デュワー瓶を用いて木材と金属の接合部の結露生成を調べると、ベイツガ、ブナ、バルサの順に小さくなり、木材の結露が吸湿性と相関することが明らかになった。

また、釘が存在すると木材の内部温度の上昇および低下が大きくなることが認められた。木材の熱伝導率について、釘が存在するとヒートブリッジとなるため温湿度を変化させると内部結露が促進されることが明らかになった。

4) 防腐剤による菌類の発育抑制

結露によって木材の含水率が増大すると腐朽の原因になるため防腐効力を調べ、まず、ハロアニリド系化合物がカワラタケに著しい防腐効力を示すことを見出した。また、有機ヨード系化合物は、カワラタケおよびオオウズラタケの両者に有効なことを明らかにした。さらに、カワラタケよりオオウズラタケに防腐効力の大きい薬剤として、N-ニトロソーN-シクロヘキシルヒドロキシルアミンアルミニウム、4-ブロム-2、5-ジクロロフェノール、2、4、6-トリクロロフェノール、テトラクロロメチルチオテトラヒドロフタルイミド、ジクロロフルアニド、ペンタクロロフェニルラウレートが見出され、オオウズラタケよりもカワラタケに効力の大きい化合物として、N-シクロヘキシル-N-メトキシ-2、5-ジメチルフラン-3-カルボキシイミド、3、4-ジクロル-3-トリフルオロメチルカルバニリドを見出し、薬剤によって白色および褐色腐朽菌に対する効力が異なる点に新たな考察を行った。

5) 防腐剤の浸透性

口紙を用いた場合の浸透指数(P)について検討し、P値は薬剤の濃度が高くなると小さくなり、水の場合は、水溶性薬剤より大きいことを示した。つぎに、新たに浸透性試験装置を試作し、浸透性の測定方法を提案した。この方法は、空気流出法によって均一な試験体を選出できる点に特徴があり、4種の樹種について木材薄片を選出した。空気透過性は木材の比重と密接な関係があり、ブナの透過性をもっとも低く、スギ、ベイツガ、バルサの順に大きくなった。乳剤の浸透量は、油溶性薬剤の約1/2であることを見出し、バルサ、ベイツガ、スギ、ブナの順に浸透量が小さくなることを強調している。また、バルサ、スギおよびベイツガについては、油溶性薬剤と乳剤の浸透性に直線関係が見出され、空気透過性によって木材防腐剤の浸透量を求めると推論している。

〔昭和62年度・筑波大学農学博士（課程博士）〕

氏 名 雷 沛豊

論文題目 代かきにおけるハス田土壌の沈下と透水性に関する実験的研究

主査：多田 敦 副査：榎根 勇（地球科学系）、鈴木光剛、佐藤政良

論文の要旨

ハスの植え付けは稲と似て、湛水条件下の代かき土壌に行われている。この代かき操作によって、作土を無構造かつ均一にし、土壌硬度を低下させて、水稻やハスの移植と生育に良好な環境を作る。しかし、代かき土壌の物理性が変化しやすく、特に深さ方向の透水性や土壌硬度の変化はハスの品質に大きく影響を与えていると言われている。ハス田においては代かき後の作土は土粒子が沈降し、田面は沈下して土壌硬度や透水性に変化を与えることが考えられる。この現象は地下水位や排水路水位が低下し、動水勾配が大きくなると、作土の沈下に浸透作用も関与して、複雑な状況を生ずる。

レンコン生産を維持するために圃場整備は必要であるが、その基礎資料となるハス田土壌の物理性に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。

そこで、本研究ではハス田や水田における代かきを想定して、室内でペースト土壌と懸濁液の沈下と浸透現象を実験によって検討した。

本研究の特徴

本論文ではまず現地圃場の調査結果に基づき、実験モデルの条件を設定し、代かき土壌の沈下現象を確認した上、沈下現象と浸透現象との関係を解明した。さらに沈下と浸透現象に及ぼす次の因子の影響を明らかにした。

(1)初期条件としての初期間隙比、(2)排水条件としてのi.降下浸透の有無、ii.排水位差の大きさ、iii.浸透中の排水位差の変化。

結果の概要

1)代かき土壌における浸透を理解する上で沈下現象の視点を無視できない。また、降下浸透のない試料と比べて、降下浸透がある場合は、排水条件がよいので、土柱の沈下量が大きいにもかかわらず、沈下の継続時間は短い。

2)初期間隙比の差によって、代かきしたハス田土壌の沈下方式が異なる。本実験に用いたハス田作土試料では、単粒子自由沈降が発生する下限初期間隙比は6.8～8.9の間であり、凝集沈降が発生する下限初期間隙比は約4.8であった。

3)排水位差DHの増大はペースト土壌の沈下Sを増大させる効果がある。一方、排水の面から見ると、DHの増大に伴い、沈下量が大きくなり、土柱の高さが短くなるので、平均動水勾配は排水位差の増加率より大きく増加し、流出量を増大させる効果がある。逆に、土壌の透水性が沈下によって低下し、流出量を小さくする効果もある。排水位差により、土壌沈下が起こる場合、透水性の低下が平均動水勾配の増大より流出量の変化に大きく影響を及ぼす。

4)水位差の急激な増加に対して、土柱の沈下速度と流出速度は水位差の増加率以上に急激に大きくなる。その後、水位差を一定のまま維持すると、沈下速度と排水速度は徐々に小さくなり、やがて安定状態に落ち着く。排水位を順次下げて行くと、同様な沈下速度と流出速度の変化過程を繰り返しながら、土壌沈下と降下浸透が進んで行く。

5)土柱内各高さでの沈下量を見ると、底面に行くほど大きくなり、表面付近では小さいことがわかる。しかし、沈下継続時間を見ると、底面付近では短く、表面付近では長い。

6)間隙水圧の分布から判断すると、不安定状態にある代かき土壌からの流出速度の変化の主な原因の一つは土柱下部での動水勾配の大きな変化にあることが指摘される。安定状態になったあとの代かき土壌の透水性の高さ方向への変化も明らかにした。下層部に行くほど透水性が小さい。さらに、沈下現象を伴う降下浸透が起こる場合、土柱底部付近の動水勾配が土柱にかかる平均動水勾配よりずっと大きい値を取る。そこで、降下浸透を開始してから、土柱の沈下がほぼ安定になるまでの間に、(平均動水勾配) × (平均透水係数) で求めた流出量より数倍ないし数十倍の流出量がある。

7)沈下体積と流出量を比較した結果あるいは間隙水圧の分布から判断すると、降下浸透を開始してからしばらくの間は、土柱の下層には下方への排水、土柱の上層部には上向きの排水が存在すると判断できる。そこで、上向き排水量 Q_u の概念を導入して、土柱表面を通り上方向に排出される水量を計算してみた。排水位差が異なり、初期間隙比を同じとした実験では、 Q_u の経時変化曲線はほぼ重なる。それに対して、初期間隙比が異なり、排水位差を一定にした実験では、 e_0 の増大につれて上向き排水量が大きく増大することが分かった。

8)今回の試験条件では、ペースト土壌の沈下に伴う透水性の変化は、微細粒子の動き（淘汰作用）に起因するのではなく、主として土性は同一のままではあるが、土柱の深さ方向での不均一な沈下により下層部の間隙比が小さくなることに原因がある。また、土壌間隙比の変化に伴う土壌硬度の深さ方向の変化も明らかにした。

氏 名 郭 康権

論文題目 農林廃棄バイオマスの圧縮成形メカニズムに関する基礎的研究

主査：吉崎 繁 副査：青山経雄、小中俊雄、小嶋英一（応用生物化学系）

論文の要旨

本論文は、農林廃棄バイオマスの圧縮成形機設計・導入のための基礎資料を提供する目的で、樹皮、木質材および粒殻等代表的な農林廃棄バイオマスの圧縮特性、ペレット成形特性およびペレット成形メカニズムについて研究を行ったものである。

第1章では樹皮、木質材のペレット成形施設の概況、従来の研究および本研究の目的を示した。

第2章では、原形または粗砕した7種の農林廃棄バイオマスを供試して、低圧圧縮試験および高圧圧縮試験を行うとともに、粉碎材料について加熱圧縮試験、応力緩和試験およびクリープ試験を行った結果をとりまとめた。すなわち、

①バイオマスの圧縮特性

シリンダ内においてバイオマスを圧縮する場合、材料の見掛けの体積ひずみ ε とプランジャ面の加圧力 P_o およびシリンダ底部の受圧力 P_b との関係は以下に示す川北式で近似することができる。

$$\varepsilon = \frac{abP}{1+bP}$$

ここで P は加圧力 P_o または受圧力 P_b を表し、 a 、 b は試験条件によって決まる定数。

定数 a は材料の初期空隙率 r_o の増加に従い直線的に増加し、次式で近似できる。

$$a = 0.733r_o + 0.22$$

低圧圧縮試験においては、充てん量 Q やシリンダ径 D を変化させた場合、川北式は次のように示される。

$$\varepsilon = \frac{(0.733r_o + 0.22)(\beta_1 Q + \beta_2 D + \beta_0)P_o}{1 + (\beta_1 Q + \beta_2 D + \beta_0)P_o}$$

ここで、 β_i は、川北式の定数 b の重回帰分析より得た偏回帰係数、 $i = 0, 1, 2$ 。

また、平衡含水率(7~12%wb)の粉碎材料では、充てん量、シリンダ径およびシリンダ温度 T を変えた場合、加圧力と体積のひずみとの関係は次式で示される。

$$\varepsilon = \frac{(0.733r_o + 0.22)(\beta_1 Q + \beta_2 D + \beta_3 T + \beta_0)P_o}{1 + (\beta_1 Q + \beta_2 D + \beta_3 T + \beta_0)P_o}$$

ここで、 β_i は同上偏回帰係数、 $i = 0, 1, 2, 3$ 。

②バイオマス圧縮時のレオロジー的挙動

粉碎材料に、一定の体積ひずみを与えた応力緩和特性および一定の加圧下でのクリープ特性は、5要素 Maxwell モデルおよび5要素 Voigt モデルが近似できる。

③バイオマス圧縮時の圧力伝播

低圧圧縮試験では圧力伝播に関するいわゆる Shaxby-Unkel の理論式が成立し、圧力比 P_b/P_o と形状比 H との関係は次式で近似できる。

$$P_b/P_o = \exp(-\alpha H/D)$$

ここで、 H は被圧縮材料層の高さ、 α は材料によって決まる定数。また、粉碎材料を圧縮する場合、Shaxby-Unkel の理論は次のように修正する必要がある。

$$P_b/P_o = \exp(-4\mu k \frac{H}{D}) + \frac{n}{kP_o} [1 - \exp(-4\mu k \frac{H}{D})]$$

ここで、 $k = (1 - \sin\phi)/(1 + \sin\phi)$ 、 $n = 2Co \cdot \cos\phi/(1 + \sin\phi)$ 、 μ は材料とシリンダ壁面との摩擦係数、 ϕ は材料の内部摩擦角、 Co はクーロン法則により得られる材料の粘着力。

第3章では、実際の成形プラントで稼動しているローラ式リングダイ型ペレット成形機の調査結果、ディスクダイ型ペレット成形機の成形試験結果について記述するとともに、成形ペレ

ットの性状、圧縮、せん断、曲げ破壊荷重等の測定結果について論じた。すなわち、

①バイオマスのペレット成形性

材料の種類、含水率およびダイ成形孔の形状・寸法によってペレット成形性が異なるが、成形試験では、樹皮、稲わらおよび落花生莢は、木質材および穀類と比べて成形し易い材料であり、ディスクダイ型成形機の場合、材料含水率が20%wb、リンダイ型成形機の場合、11~19%wbの範囲で成形率が最高であった。また、成形試験では、孔径10mmのダイを用いた場合、成形消費動力が少なく、ペレット成形率が高い値を示した。

②ペレットの密度

成形ペレットの密度は材料の種類によっても異なるが、成形プラントの調査では、1.24~1.38g/cm³の値が得られ、成形試験では1.0~1.4g/cm³となった。また、一般にペレットの含水率が増加するにつれ密度は減少した。

③ペレットの破壊荷重

ペレットの破壊荷重は材料の種類、含水率およびダイの寸法によって異なり、調査研究によれば、ペレットの圧縮破壊荷重は310~630N {32~64kgf}、せん断破壊荷重および曲げ破壊荷重は46~92N {4.7~9.4kgf} および7~21N {0.7~2.1kgf} であった。

第4章では、ローラ式ペレット成形機の成形過程の解析に基づき、プランジャ・シリンダ圧縮試験装置を用いたペレット成形のモデル試験結果について記述した。すなわち、

①ペレット成形性に対する各因子の影響

ローラ式成形機を用いてペレット成形を行う場合、ローラからの加圧力は材料と成形孔との壁面摩擦力に左右されるので、ペレット成形性を解明するために、ペレットの密度と壁面摩擦力について解析を行った。

1) シリンダ温度が高くなるに従って壁面摩擦力は減少し、ペレットの密度は100℃内外で最も大きくなる。

2) シリンダ径が小さくなるに従って、同一加圧力においてはシリンダ内同一高さ下層の材料が受ける圧力は小さくなる。

3) 加圧力が大きくなるに従って、壁面摩擦力は増加し、ペレットの密度もまた増加する。

4) 材料の種類によりペレット成形性が異なり、スギ木質材、穀類、ヒノキ樹皮の順に壁面摩擦力が減少し、ペレット密度が増加する。

5) 材料の水分はペレット成形性に大きな影響を与え、水分が9%前後で壁面摩擦力とペレットの密度とともに最大値を示す。

②ペレット成形所要圧力の推定

モデル試験の結果、加圧力が12~187MPaの範囲では、成形ペレットの密度と加圧力との関係は、対数関数で近似できた。例えば、孔径10mmのダイを用いて、粒度0.5~1.0mmのヒノキ樹皮、スギ木質材、穀類を密度1.3g/cm³のペレットに成形するためには、各々約64.9、151.5、100.6MPaの加圧力が必要と推定し得る。

③成形孔の直線部長さと成形性

バイオマスをペレット成形する場合、ローラからの加圧力は材料と成形孔の壁面との摩擦力に左右され、その壁面摩擦力は成形孔の直線部長さに比例すると考えられる。

試験の結果、加圧力の増加に従い、受圧力が0となる時の材料層の高さは直線的に増加する。すなわち、ダイの厚さが増加するに従って、必要とするローラの加圧力は直線的に増加する。

前述した加圧力を得るためには、成形孔の直線部長さは各々73mmおよび38mm内外が必要であると推定し得る。

第5章では、本研究により得られた知見を総括した。

氏 名 カシム・ブヒラン
論文題目 **Water Management System for Rice Irrigation Schemes in Japan and Malaysia**（日本とマレーシアの水田農業用水における水管理システム）
主査： 鈴木光剛 副査：多田 敦、小中俊雄、佐藤政良、花田毅一（農林学系）

論文の要旨

本論文は、マレーシアと日本両国における現行の水管理システムとその機構を、モデル地区を設定して実証的に分析、解明し、マレーシアにおける将来の水田灌漑における効率的な水管理実現のための基礎条件を明らかにしたものである。すなわち、水管理の規定条件となる水路密度から、マレーシアにおいては Tanjung Karang 地区、日本では福岡堰地区を選定し、各々の地区に関し地区レベル（scheme level）及び圃場レベル（onfarm level）での水管理システムの比較検討を行い、従来ほとんど研究されていなかった水管理の量的構成と管理組織の分析を行い、両地区の水管理特性を明らかにし、さらに、将来の効率的な水管理手法の構成条件を明らかにした。

その概要は、次の通りである。

（1）水管理システム

Tanjung Karang 地区の主要水源施設である Bernam 頭首工は、導水路を經由して最大28.3m³/sの用水を Tenggi 川へ注水する。用水は、Tenggi 川の下流部で再び取水され、幹線用水路へはいる。水源流量の分析の結果、実取水量は20m³/s以下で、設計容量より小さかった。また、Tenggi 川を流下する間に、主として右岸の泥炭沼地から、通常3m³/s程度の補給があるが、一方、最も用水の必要度が高い渇水期には、逆流によって時々流量が減少することが分かった。以上の分析により、Tanjung Karang 地区の利用可能総水源水量は、同じ Bernam 川から取水する Bagan Terap 揚水機場からの補給を合わせて25m³/s、水深表示で10.9mm/dに過ぎないことが明らかになった。

小貝川を水源とする福岡堰地区の最大取水量は水深表示で41.8mm/dで、Tanjung Karang 地区よりかなり大きい、実取水量は30mm/d程度であった。

以上の事実から、Tanjung Karang 地区において適切な水管理を行うためには、新たな用水補給システムが必要であることが明らかになった。

(2) 作期調整システム

Tanjung Karang 地区における水稻二期作のための用水配分管理は、利用可能水量が限定されているため、地区全体を大きく三つに分け、作期をずらすように計画された。この作期調整は、過大な用水量の発生を回避し、農民に適正な時期の作付を保証するためのものであった。しかし、この調整システムは、地区全体としての栽培期間の伸長、周年の作付という結果をもたらし、害虫防除の上で大きな問題を発生させた。この調整システム下の灌漑計画では、Tanjung Karang 地区全体に対する用水量ピークは、雨期では4月に、乾期では10月に発生する。この用水量の両ピーク発生時期は、降水量のピークとは一致しているが、さらに初期用水の不足を緩和するため、幹線排水路末端のゲート操作によって地下水位を上昇させて用水不足に対処しようとしている。

これにたいし、本研究では、Tanjung Karang 地区における無作期、無灌漑期の実現可能性を示した。すなわち、害虫防除効果の点から、無作期は最乾燥期にすべきであり、降水量の分析から、完全無作期を8月初めから30日間とするのが適当であることを示した。さらにこの実施による用水量の増加に対しては、圃場レベルにおける排水路水位管理および用水の反復利用によって対処できることを明らかにした。

(3) 田面水深管理

Tanjung Karang 地区では、圃場レベルの小用水路が6,000m程度と長く1.2ha区画の水田を200枚以上支配するので、特に渇水期においては、用水配分の不均等が生じ易い。本研究のための調査時には、上下流の不均等は、下流取水量が対上流比20%減と比較的少なかったが、水源水量の絶対量が少ないため、下流部が実際に取水できた水量は、良好な水田管理の実現にとって限界的なものであった。また、圃場内の田面水位連続観測から、灌漑期初期の取水が、直播された稲の成長段階に合わせて行われていることが示された。すなわち、灌漑開始時には、ゆっくりと圃場を湛水させるように小さな取水強度であるが、稲丈が10から15cmになった時、湛水深の増加によって雑草の生育を抑制するため、最大の取水強度となる。田面水深は、普通期の間100から200mmと、日本の場合の50から100mmと比較して極めて大きい。

福岡堰地区では、取水及び田面水深の管理は、肥料、薬剤の散布、中干しといった農作業に合わせて実施され、Tanjung Karang 地区に比べて水深管理が緻密である点が明らかになった。

(4) 栽培管理用水

水収支解析を行い、ブロック内における現況用水管理の量的構成を明らかにした。すなわち、栽培管理用水の量は、福岡堰地区と Tanjung Karang 地区の上流部でほぼ同じ7から9mm/dであった。しかし、Tanjung Karang 地区の下流部では、栽培管理用水の量は小さく、逆に降雨の有効化率は高いという結果になった。これは、灌漑期における排水路末端ゲート操作によるものと考えられる。

栽培管理用水に密接な関連があるとみられる水管理投下労力の分析では、総投下労力は、T-

anjung Karang 地区と福岡堰地区で差がなかったが、時期配分については顕著な違いがあり、前者では灌漑初期にピークがあって、直播された稲の生育に対する関心の強さを反映し、後者では中期にあって、収量増加のための水位管理がその理由であろうと考えられた。

(5) 水管理制度

現在、日本においてはほとんどの灌漑排水施設は、土地改良法に基づき、農民自身が運営する土地改良区によって管理されている。また、土地改良区の運営費は、すべて土地改良区組合員の負担になっている。すなわち、その管理システムは、末端部落レベルにおける農民自身の管理参加によって支えられているのが特徴で、これによって、土地改良区が実際に操作管理を行う対象も基幹的施設に限定されているのである。

マレーシアにおいては、灌漑排水施設の操作、維持管理は、日本と異なり、政府灌漑排水局(D I D)の責任に属する。実際の操作を含めてこれらの業務のすべてがD I D自身によって実施されるため、農民との不断の接触を起こさせる有効なシステムが形成されない。日本の経験は、用水管理の地域的対立に関する農民の直接交渉が重要であることを教えており、その点から、マレーシアにおける農民水利組織の形成にとって、用水系統を基本とするグルーピングが重要であることを指摘した。そして Sungai Burung 灌漑ブロックを例に、現行の農業技術普及農民組織がこの必要条件を満たし、将来の水管理組織の母体として利用可能であることを明らかにした。

〔昭和63年度 筑波大学農学博士(課程博士)〕

氏 名 スラサック・パムルンウォン

論文題目 **Mechanical Properties of Long Grain Rice with Reference to Whitening Process** (精白工程に関連した長粒型米の機械的性質)

主査：吉崎 繁 副査：相原良安、小中俊雄、上田堯夫(農林学系)

論文の要旨

本論文は、精白工程下に焦点を合わせた長粒型玄米および白米の機械的性質、すなわち破壊荷重、破壊エネルギー、破壊変位量、圧縮・曲げ・衝撃強さ、弾性係数等を測定・解析したものである。

供試材料は、K D M L 105およびI R 60(長粒型米)の2品種で、比較のために日本晴およびコシヒカリ(短粒型米)2品種を用いた。供試米粒は、残留応力の影響を除くために機械を用いず人手による脱ぶおよび精白を行ない、温度20°C、相対湿度33.0、54.6および75.5%の各条件のもとで、約1月間の調湿を行った。

圧縮および3点曲げ試験で用いた装置は、恒温恒湿容器およびコンピュータ制御・処理シス

テムを備えた精密万能材料試験機であり、圧縮速度1.25mm/minの準静的条件で測定を行った。

一方重錘落下式衝撃試験では、ロードセル、動歪み計、波形解析装置およびオシロスコープを用いて測定を行った。

得られた結論は以下のとおりである。

(1) 圧縮特性

圧縮試験より得られた荷重－変位曲線は、圧縮初期の段階においては下に凸の非線型であり、つづく圧縮段階においては線型であった。荷重－変位曲線においては降伏点が存在せず、米粒は脆性材料としての挙動を示した。

玄米と白米の圧縮破壊荷重の平均値は、長粒型米では63～128Nおよび51～121N、一方短粒型米では61～118Nおよび46～108Nであった。

玄米と白米の圧縮破壊変位量は、長粒型米では84～97 μ mおよび59～72 μ m、一方短粒型米では103～112 μ mおよび72～90 μ mであった。

玄米と白米の圧縮破壊エネルギーは、長粒型米では2.3～5.0mJおよび1.3～3.9mJ、一方短粒型米では2.8～5.5mJおよび1.5～4.3mJであった。

米粒の弾性係数および圧縮強さは、2弾性体間の Herz の接触応力理論を援用して計算した。圧縮による米粒の破壊パターンは含水率の影響を受けず、破断面は荷重の方向に平行であった。

(2) 曲げ特性

3点曲げ試験により得られた荷重－たわみ曲線は、曲げの初期においては下に凸の非線型であり、つづいて線型的に増加し、圧縮試験の結果に類似の傾向を示した。

長粒型の玄米と白米の曲げ破壊荷重は、同一含水率のもとでは圧縮破壊荷重のそれぞれ約33%および29%であった。一方短粒型米では、両者とも圧縮破壊荷重の約52%の値を示した。曲げ破壊たわみ量はすべてのサンプルについて、圧縮破壊変位量の約90%の値を示した。

長粒型玄米および白米の曲げ破壊エネルギーは、圧縮破壊エネルギーのそれぞれ約28%および23%であった。

曲げによる弾性係数は、米粒の形状を楕円体であると仮定して計算により求めた。

曲げモーメント、剪断力、接触応力さらに接触点移動の影響も考慮した弾性曲線の微分方程式を適用した。曲げ試験から得られた弾性係数は、圧縮試験から得られた弾性係数とほぼ同じ値を示した。一方米粒の引張強さは、3点曲げ試験の結果から計算により求めた。長粒型玄米および白米の引張強さは圧縮強さの14.6%および11.2%であり、短粒型米ではそれぞれ8.4%と6.9%であった。

(3) 衝撃特性

衝撃破壊現象の解析には、はじめに Herz の理論が適用できるものと仮定した単純な力学的モデルの計算から出発し、米粒の最大衝撃荷重、最大変位、衝撃継続時間、衝撃エネルギーおよび力積を求めた。さらに現実的な衝撃試験の解析のために、ロードセルのたわみの影響を考

慮した力学モデルを導いた。すなわち、米粒およびロードセルからなる 2 自由度系の非線型微分方程式に Runge-Kutta 数値計算法を適用し、衝撃荷重、最大変位、衝撃継続時間等の衝撃特性をコンピュータシミュレーションにより求めた。

米粒の破壊確率と衝撃エネルギーとの関係には 3 変数 Weibull 分布のあてはめを試み、衝撃荷重下の米粒の破壊確率が同分布によく適合することが知られ、その平均エネルギーおよび分散を算定した。

衝撃特性と圧縮特性とを比較したところ、衝撃破壊エネルギーは圧縮破壊エネルギーの約 2.47 倍であり、衝撃破壊荷重は圧縮破壊荷重の約 1.8 倍であった。また衝撃破壊変位量は圧縮破壊変位量の約 1.45 倍であり、衝撃強さは圧縮強さの約 1.2 倍であった。

氏 名 池口 厚男

論文題目 **Distribution of Ventilated Air in Closed Type Livestock Buildings**
(閉鎖型畜舎の舎内空気分布)

主査：相原良安 副査：小中俊雄、吉崎 繁、近宗千城（農林学系）

論文の要旨

家畜生産向上のための効果的な方法の一つは、家畜を好適な環境下で飼養することである。他方、畜舎内の熱、水蒸気、粉塵、ガスおよび浮遊細菌などの環境要因は気流によって移送されることから、舎内環境の調節において換気が重要な手段となる。従って換気システムと舎内環境要因の分布（空気分布）との関係を明らかにする必要がある。

本論文は、このような観点から、閉鎖型畜舎、特に近年導入され始めた無窓豚舎を対象として換気システムと空気分布との関係を明らかにし、畜舎の設計ならびに環境調節法に必要な基礎的資料を提供することを目的に、実態調査、模型実験および数値解析によって研究を行った結果を纏めたものである。結果の概要は次のとおりである。

(1) 入・排気口の位置と空気分布との関係

現存する豚舎の 6 種類の換気システムについて舎内環境を測定した。その結果は空気分布を基準として評価すると、①換気の舎内吹出口の形状と吹出気流の方向が舎内空気分布に支配的影響を与える。②冬季、舎内外の気温差が大きいとき、入気流は入気後直ちに降下し、床面近傍に低温域を形成する。③冬期、温度調節上、換気量を制限するが、換気量の減少は舎内空気の汚染につながり、豚の羅病の原因となっている。④ CO_2 ガス濃度の分布は浮遊粉塵濃度の分布および浮遊細菌濃度の分布と正の相関がある。

(2) 換気方式と空気分布との関係

(1) の結果から判断して、最も望ましいと考えられる換気方式（両側壁部にスリット吹出口があり、天井中央部に円筒排気口を有する）をもつ豚舎を対象として吹出気流を任意方向に

変えることができる2枚の平板ダンパをスリット吹出口の上下に取付けた豚舎模型を作製し、アルキメデス数 (Ar) 一致の近似相似則を援用して模型実験を行った。

1) 夏季の換気条件を想定して、吹出気流方向を規制する下方平板のダンパが鉛直方向となす角 (ダンパ角度) を30、45、60°に、吹出気流速を2.0、4.5m/sに変えた組合せ条件での結果は①ダンパ角度が45°で吹出気流速が4.5m/sの場合に最も望ましい気流分布が得られた。②舎内気流の無次元速度は大部分の空間で0.2以下となった。③乱流エネルギーや気流のパターンなどから判断して豚房上部に空気の停滞域が生じがちである。④豚房上部の空気の停滞域はダンパの取り付け方法を改良することによって解消できる。

2) 冬季の換気条件を想定して吹出温度差、換気回数、およびダンパ角度と舎内空気分布との関係について実験を行った結果は①舎内温度分布に最も影響するのは換気回数である。②換気回数が5～15回/時の範囲では、舎内温度およびその分布に問題はない。③吹出気流は吹出方向に関係なく、側壁内部近くの床面に降下するが、その降下位置と吹出口における Ar との間には相関が認められた。④吹出口における Ar と舎内温度変動の間には負の相関があり、Ar をパラメータとして舎内温度分布を制御できる。

3) ダンパ角度、吹出気流速、吹出温度差および換気回数とCO₂ガス濃度分布との関係は、①夏期と冬季の両条件においてCO₂濃度分布に最も影響するのはダンパ角度であり、ダンパ角度45°において最も望ましい分布が得られた。②冬季条件において、換気回数5～15回/時とCO₂濃度分布との間には有意差は認められなかった。以上から、冬季条件において換気回数を増しても汚染空気を十分に排除することはできなく、ダンパ角度すなわち、吹出気流方向を適切にすることによってのみ汚染空気は排除することができるといえる。

(3) 数値解析による気流分布の予測

1) 舎内を噴流域と乱流域に区分し、吹出気流を2次元自由噴流で近似させ、Tollmien の解を用いて気流分布の予測を行い、模型実験の結果と比較検討した結果は、計算値と実験値には相当の差があり、この予測法は適用できないことがわかった。

2) 乱流モデルのゼロ方程式を援用し、有限要素法を適用して夏季条件における2次元気流分布の予測を試みた結果は、①定性的な気流のパターンについては模型実験とはほぼ一致する。②気流速分布については全体的に差があり、特に吹出口近傍の差が大きい。このことから、舎内空気の停滞域 (渦) や大要の気流パターンを予測するために、本予測法は有効であると判断した。

〔平成元年度・筑波大学農学博士 (課程博士)〕

氏 名 陳 青雲

論文題目 べたがけの環境調節機能に関する実験的研究

主査：相原良安 副査：小中俊雄、吉崎 繁、鈴木芳夫 (農林学系)

論文の要旨

べたがけは、作物栽培上、通気性被覆資材を作物に直接あるいは若干の空間を設けて被覆することである。近年、このべたがけは、その効果の確認と新資材の開発に相まって急速に増えつつある。しかし、べたがけについての研究が始まったのは2～3年前からで、その研究のほとんどは栽培試験に関するものであり、べたがけ資材そのものの特性はほとんど明らかにされていない。したがって、使用資材、対象作物、地域などの各種条件の組合せの中から適切な資材や使用方法を選択することは困難であり、試行錯誤的な実験が続けられているのが現状である。このような現状において、べたがけ資材の環境調節機能に係わる物理的特性を明らかにし、これらの特性と被覆下の環境との関係を評価することは重要な課題である。

本研究は、このような観点から、市販されているべたがけ資材のポリエステル製長繊維不織布2種類（A、B）、ポリプロピレン製長繊維不織布1種類（C）、ポリビニルアルコール製割繊維不織布2種類（D、E）を供試して、①べたがけの環境調節機能に大きく影響する資材の特性として、間隙率、長波放射特性、日射透過率、通気特性および保温性を選び、その測定方法を考案し、特性値を明らかにする。②実際のべたがけ栽培試験を行い、べたがけが作物の発芽勢と成長量に及ぼす影響を分析するとともに、被覆下の環境と資材の特性との関係を定性的に分析する。③べたがけ資材の長波放射特性が、夜間における正味放射量および葉温に及ぼす影響をシミュレーション・モデルにより解析する。

(1) べたがけ資材の基本的特性

1)間隙率：資材を撮影して、繊維部分を黒、間隙部分を白の2色の写真を得る。この写真をイメージスキャナを通じて、コンピュータにより1 - 黒と0 - 白と読み取る。1の総数と0の総数から間隙率を求めた。

長繊維不織布のAの間隙率は最も小さく、0.19であり、割繊維不織布のEの間隙率は最も大きくて、0.54であった。後者は前者の約3倍になり、B、C、Dの間隙率は、それぞれ0.39、0.43、0.48であった。このように資材によって間隙率に大きな差があることを定量的に明らかにした。

2)長波放射特性：温室用フィルムなどの長波放射特性を放射率計で測定する方法を、べたがけ資材に準用することを検討して、各資材の長波放射に対する透過率、吸収率および反射率を明らかにした。なお、透過率と間隙率との間には、素材の透過率が特に大きいポリプロピレンCを除いて、正比例関係が成立することがわかった。

3)日射透過率：入射角0～40°での日射透過率は、0.80～0.91であり、資材間で若干の差があった。また、入射角が40°から80°まで増加するに従い、日射透過率は徐々に低下し、入射角80°では0.65～0.75になった。入射角40°以上の日射透過率の低下割合が、温室用フィルムと比較して、小さいことがべたがけ資材の特徴といえる。

4)通気特性：通気特性は、通気率と流量係数で評価した。通気率はA～Eの順に、2.3～40.

1m³/m²minPaであり、流量係数はA～Eの順に、0.23～0.80であった。通気率aと間隙率Poとの関係は $a=0.49 \times 10^{3.6Po}$ で表され、流量係数fと間隙率Poとの関係は $f=1.46Po$ で表された。

5)保温性：べたがけ資材の保温性は熱貫流率と換気伝熱係数との和で表される放熱係数で評価し、温室用のポリエチレンフィルム（PE）および塩化ビニルフィルム（PVC）の保温性と比較検討した。①PEとPVCはともに放射熱貫流率が資材面の水蒸気凝結によって、減少したが、対流熱貫流は、逆に増加した。また、放射熱貫流率と対流熱貫流率とを合わせた総括熱貫流率は5.2～6.7W/m²kであった。②べたがけ資材の放熱係数を風速別に測定した。無風と時の放熱係数は、A～Eの順で、7.3～36.6W/m²kであり、風速3m/sのときの放熱係数は18.7～78.0W/m²kであった。また、換気伝熱係数は、放熱係数の29～96%を占め、べたがけ資材の場合の放熱量はほとんど換気によるものであることが明らかになった。

(2) べたがけが作物の発芽勢および成長量に及ぼす影響

1)べたがけでの作物の発芽は露地に比べて、2～3日間早められた。べたがけ資材間ならびにじかがけとうきがけ間の発芽状況の差は顕著ではなかった。この場合の土壤含水比は、べたがけ区が無被覆区より2～7%と高く、深さ2cmの地温もべたがけ区が無被覆区より2～4℃高くなった。これらのことが、べたがけが発芽促進に効果的な最も大きな要因であると考えられた。

2)べたがけ区は無被覆区と比べて、作物の葉面積指数、生体重および乾物重が増大する効果がみられた。資材間では、A資材が葉面積指数と生体重を最も増大するが、乾物重は逆に最も小さくなった。これは、A資材の間隙率が0.19と極めて小さいので、被覆内空間は高温多湿の環境となり、作物がいわゆる軟弱徒長になったと考えられた。

3)400～500W/m²の日射量下で、べたがけ内外の気温差と換気率との関係は次式で表された。

$$\Delta T = a/q^b$$

ここで、 ΔT ：べたがけ内外の気温差、K

q ：換気率、m³/m²h

a 、 b ：定数（本実験では、それぞれ20.3と0.6であった）

(3) べたがけ資材の長波放射特性と正味放射量および葉気温差の関係

1)べたがけ下の正味放射量の減少効果を表す指標PI（protection index）と資材の透過率 τ との関係は、次の回帰式で表すことができた。

$$PI = 1 - \exp \{ -1.56 (1 - \tau) \} \quad (r=0.96)$$

2)葉面熱収支から次のような葉気温差の計算式を導いた。

$$T_l - T_a = \{ (1 - PI) R_n + 2hr \Delta T_{as} \} / (2hc + 2hr)$$

ここで、

T_l ：葉温、℃

R_n ：正味放射量、W/m²

T_a ：気温、℃

hr ：放射伝熱係数、W/m²K

ΔT_{as} ：気温と地温との差、K

hc ：対流伝熱係数、W/m²K

この式からの葉気温差の計算値と圃場での実測値とはよく一致した。