

アクチバブルトレーサー法による農耕林地の水浸透能の計測

結田 康一

農林水産省農業環境技術研究所 *

Measurement of Infiltration Capacity by the Activable Tracer Method in the Agricultural
and Forest Land of the Ashigara Plain and the Adjacent Areas

by

Koichi YUITA

National Institute of Agro-Environmental Sciences

1. 研究目的

プロジェクト研究「国土資源」の中で、農耕林地の水浸透能（水涵養機能）の定量的計測手法の一つとしてアクチバブルトレーサー法による土壌水の追跡技法を開発した（結田、1988）。すなわち、「臭素（Br⁻）を水のトレーサーとして撒水し、土壌中の任意の位置の土壌水を土壌水採取装置（本プロジェクトで開発）で随時採取し、土壌水中臭素を非破壊放射化分析法で分析することによって、土壌水の表層から浅層地下水層までの動きを追跡する手法」である。

ここでは、この手法を用いて酒匂川流域内農耕林地の水浸透能（浸透速度や浸透量）の定量的計測を行った。さらに計測値と、水涵養評価式から得られた評価点との関係について言及した。

2. 研究方法

(1) 試験地の選定

水涵養機能の主要な要因である土地利用形態にまず注目し、流域の水涵養地域の土地利用形態を反映させ、森林、茶園（樹園地）および水田を選んだ。

森林および茶園は、土壌および表層地質の透水性が極めて良好な礫質土壌と平均的な壤質土壌で覆われた箱根外輪山東麓（この東斜面は主として森林からなるが、山麓部はミカンや茶園等の樹園地がかなり分布している）を選んだ。さらに地域性を考慮して南足柄市三竹（壤質単色黒ボク土）と山北町谷峨（礫質単色黒ボク土）の2ヶ所に、それぞれ林地と隣接の茶園（平坦かやや傾斜）を選定した。

水田は、足柄平野の地下水涵養部として重視されている足柄平野上部の扇状地の水田を対象とした。

* 茨城県つくば市観音台3-1-1 〒305

神奈川県温泉地学研究所報告、第19巻、第4号、71-78、1988

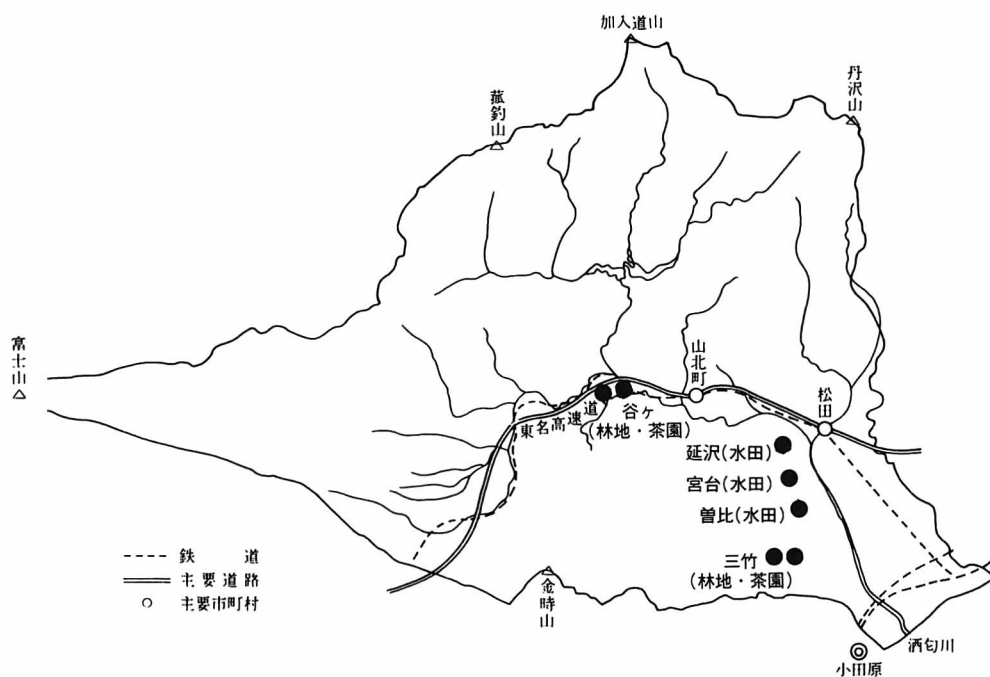


図1 アクチバブルトレーサー試験区の設定地点

この地域の水田は、酒匂川の氾濫原の厚い砂礫層の上に作土層を客土して造成されている。地下水位と土壤透水性を重視して、地下水位が深い扇央上部の延沢（中粗粒灰色低地土）と扇央下部の宮台（礫質灰色低地土）、地下水位が浅く湧水地帯である扇端部である曾比（中粗粒グライ土）の3ヶ所を選定した。図1に試験地点を示す。

(2) アクチバブルトレーサー試験法

林地と茶園は $1.1 \sim 2.2 \text{ m}^2$ 、水田は 4.86 m^2 の試験区を設け、その中に先端にポーラスカップを付けた土壤水採水管を深度別に埋設した。林地と茶園は20、40、60、80、100、150、200、250、300cm（ただし三竹のみで、谷峨は200cmまで）の深度に、水田は20cmより130～140cmまで10cmの深度差で埋設した。全試験区とも、 Br^- (KBr) 400ppmの水溶液を20mm降雨相当分、そのあと水を5mm相当分じょうろで撒水し、経時的に土壤水を採取した。林地と茶園は1983年9月から1985年8月までの約2年間にわたり、10日～2カ月の間隔で採水した（ Br^- トレーサーは1983年9月と1984年8月の2回撒水）。水田は1985年5月から1986年10月までの約1年半、灌漑期は0.5日～14日間隔、非灌漑期は2ヶ月間隔で採水した（ Br^- トレーサーは代かき後と中干し中の2回）。

(3) 減水深測定法

水田減水深測定器（東大N型）を経時的に地点を変えて埋め込み、取水開始から落水までの120～130日間、非降水日を選び、随時測定し浸透水量を求めた。

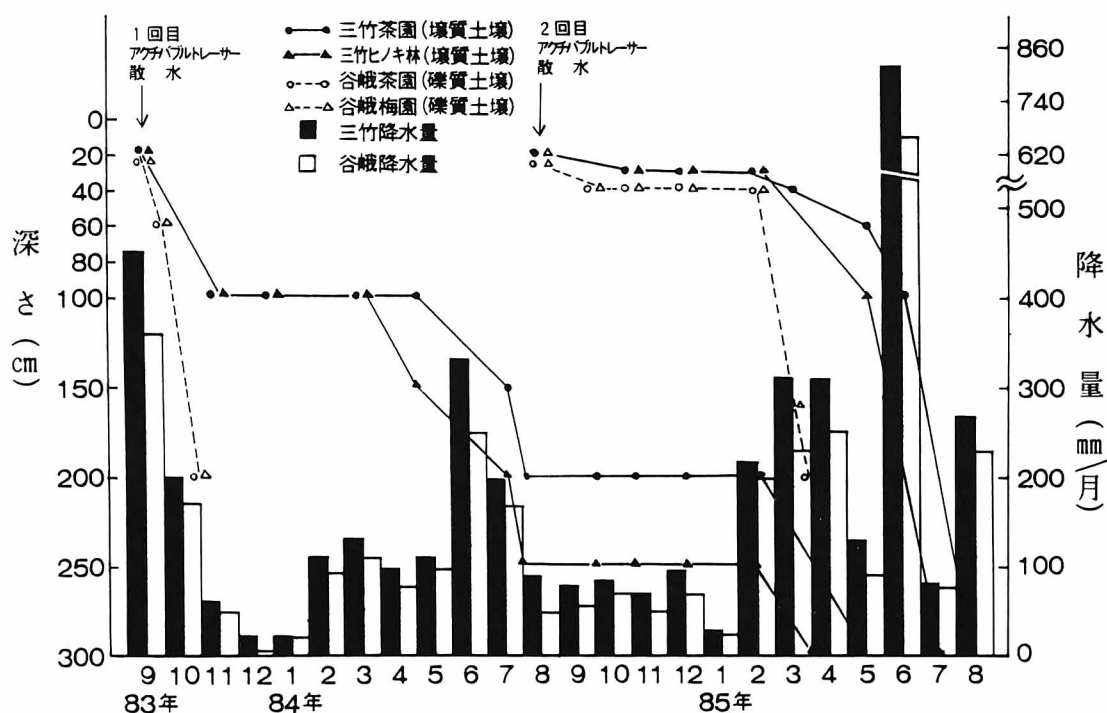


図2 降水(土壌水)の土層内垂直浸透速度(浸透深度)と月毎降水量(箱根山麓の場合)

(4) 土壌水中臭素の放射化分析法

土壌水0.1mlをポリエチレン小袋入りろ紙にしみ込ませた後封入、封入試料20点と標準体 ($\text{NH}_4\text{Br} 1.0 \mu\text{g}$ をろ紙にしみ込ませたもの) を照射用カプセルに詰め、JRR-2 炉 (熱中性子束 $5.5 \times 10^{13} \text{n/cm}^2 \cdot \text{sec}$) で3分間照射した。約70時間冷却後、各試料をポリ袋に入れ、Ge (Li) 半導体検出器・マルチチャンネルアナライザーシステムにより、 ^{82}Br の777KeVの光電ピークの放射能を測定 (1点 200sec)、標準体との比較法により臭素濃度を分析した (非破壊放射化分析法)。

3. 研究の結果および論議

(1) 箱根外輪山東麓の林地および茶園の水浸透能の計測

三竹と谷峨の林地と茶園でのアクチバブルトレーサー法による降水の土層内の垂直浸透速度 (深度) と月別降水量の2年間にわたる経時変化を図2に、垂直浸透速度、浸透水量、浸透率の実測例を表1に示した。図2から、降水量が大きいと垂直浸透速度 (深度) も大きくなることが読みとれるが、4圃場とも月降水量が100mm以下の場合にはほとんど浸透していない。例えば、1984年8月から1985年1月までの6ヶ月間は、三竹457mm、谷峨330mmの降水はすべて蒸発散で失われ、水涵養には寄与しなかったことがわかる。(表1)

表1 アクチバブルトレーサー法による降水の土壌浸透速度、浸透水量、浸透率（林地、茶園、畑）

試験圃場地点	土 壤	透水係数 cm/sec	土地利 用形態	浸透速度 cm/期間	左計測期間中 降水量 mm	土壌浸透水 量 mm *	土壌浸透 率 %
三 竹 (南足柄市)	単色黒ボク 土 (壤質)	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	茶 園	200/1年	1,754 ('83.9.12~ '84.8.16)	980	56
三 竹 (同上隣接地)	〃	〃	ヒノキ林	250/1年	(〃)	1,200	68
谷 峨 (山北町)	単色黒ボク 土 (礫質)	$10^{-2} >$	茶 園	200/50日	518 ('83.9.12~ '83.10.31)	590**	114**
谷 峨 (同上隣接地)	〃	〃	梅 園	〃	(〃)	520**	100**
農 環 研 (筑 波)	表層腐植質 黒ボク土 (壤粘質)	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	畑	80/1年	1,254 ('82.9.29~ '83.9.21)	460	37

* アクチバブルトレーサー浸透層までの土層液相率より含水量を求め、その値を浸透水量とした。

** アクチバブルトレーサーの土層内分布は他地域と異なり、ピークが2つ以上に割れており、最大浸透速度（深度）のピークより浸透水量を計算した。したがって、土壌浸透率は100%以上になったが、これは浸透水が一部の土壌空隙のみを流れたことを示している。

浸透速度は表1に示すごとく、壤質土壌の三竹茶園および隣接ヒノキ林は200cmおよび250cm/年（1983.9.12～1984.8.16）である。礫質土壌の谷峨では、茶園、梅園とも200cm/50日（1983.9.13～1983.10.31）と、さらに大きい。壤粘質土壌の筑波の畑80cm/年に比べていずれもはるかに大きい。

このときの雨水の土壌への浸透水量、浸透率は、表1に示すごとく、三竹では、茶園で980mm、56%、ヒノキ林で1,200mm、68%（約1年間）である。いずれも、筑波の460mm、37%（1年間）に比べてはるかに大きい。一方、谷峨は浸透水量では520～590mm、浸透率では100%以上（約50日間）になってしまう。これはBr⁻の最高濃度位置が2つ以上のピークとなってしまっており、その中の最深のピークから浸透水量を計算したためと推定される。つまり浸透水の一部が大きな土壌空隙を流下・浸透（重力浸透）したピークより計算したため、実際の浸透水量より大きくなったと考えられる。

毛管孔隙による浸透以外にかかる大孔隙や亀裂による浸透がみられる礫質土壌においては、浸透水量は正確に把握することは難しいことを示している。しかし、谷峨の場合、25mm相当の人工降雨を試験区に約20分間で撒水し終えたにもかかわらず、一気に浸透してしまった状況からみて、よほどの豪雨でない限り、表面流去することなく下層へ浸透してしまうであろう。つまり蒸発散以外はすべて浸透すると推定される。

なお、降水時期を異にする土壌水は、土層内で混ざることなく平行移動的に浸透する状況が、図2の2回目のアクチバブルトレーサー撒水（1984年8月）以降の浸透速度分布から読みとれる。

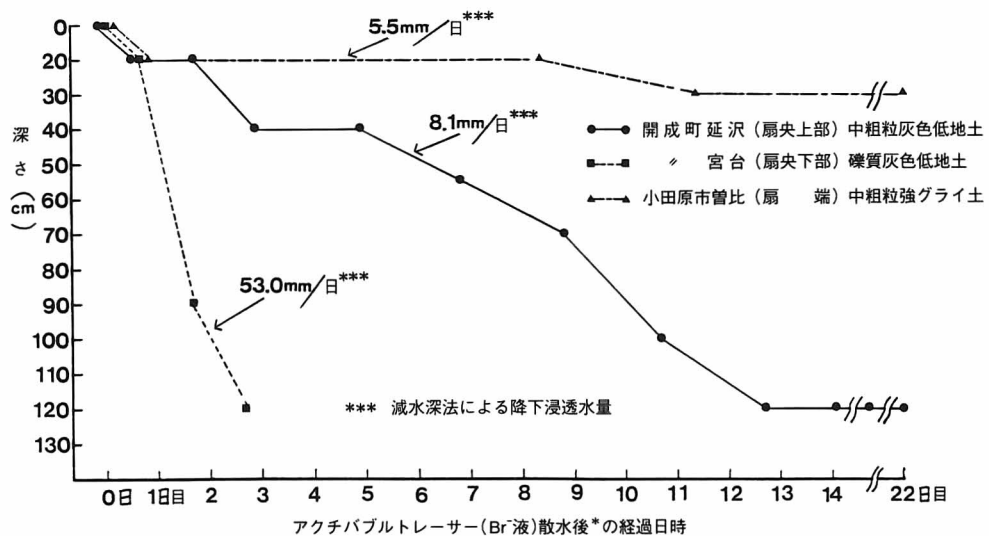


図3 灌漑水の土層内垂直浸透速度（浸透深度）－水田－
（＊7月28日～29日にかけて Br^- 液散水、＊＊ Br^- 最高濃度位置）

表2 アクチバブルトレーサー法および減水深測定法による灌漑水・降水の土壌浸透速度と浸透水量（水田）

試験圃場地点	土 壤	透水係数 cm/sec	土地利 用形態	土壌浸透速度 cm/期間	灌漑期間中土壌 浸透水量 mm	年間降水量 mm
延 沢* (開 成 町)	中粗粒 灰色低地土	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	水 田	120/13日 ('86.7.28～ '86.8.10)	986(122日間) ('86.5.16～ '86.9.22)	1,344.5
宮 台* (開 成 町)	礫質 灰色低地土	$10^{-2} \sim 10^{-4}$	〃	120/3日 ('86.7.29～ '86.8.1)	4,540(110日間) ('86.5.23～ '86.9.11)	〃
曾 比 (小田原市)	中粗粒 グライ土	$< 10^{-5}$	〃	30/11日 ('86.7.29～ '86.8.8)	536(109日間) ('86.5.19～ '86.9.27)	〃

*延沢：扇状地扇央上部、宮台：扇状地扇央下部、曾比：扇状地扇端
'86.1.1～'86.12.31金井島（上消防）観測所

(2) 足柄平野上部水田の水浸透能の計測

アクチバブルトレーサー法による水田3試験区における灌漑水の垂直浸透速度実測例を図3に、減水深法による全灌漑期間中の降下浸透水量を表2に示した。

図3より、宮台はわずか3日で120cmまで浸透、延沢は13日で120cmまで、それ以降は22日後でもより下層へは浸透せず、曾比は11日間で30cm、それ以降は22日後でもより下層へ浸透しないことが読みとれ

表3 水田(曾比)*での深度別土壌水中臭素濃度(ppm)の経時変化

採水日 深度 cm	7/29	7/30**	8/3***	8/10	8/16	8/21	9/11	10/16
20	0.5以下	6.9	4.2	1.3	0.48	0.5以下	0.5以下	0.5以下
30	〃	0.5以下	0.5以下	0.81	1.1	〃	〃	〃
40	〃	〃	〃	0.98	1.8	1.5	0.85	〃
50	〃	〃	〃	0.87	1.2	1.0	0.5以下	〃
60	〃	〃	〃	0.75	0.89	0.47	〃	〃
70	〃	〃	2.9	1.3	1.1	0.59	0.63	〃
80	〃	〃	0.5以下	0.87	0.81	0.5以下	0.5以下	〃
90	〃	〃	〃	0.5以下	0.5以下	〃	〃	〃
100	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
110	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
120	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
130	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃

* 灌漑期(湛水時)地下水位40cm、非灌漑期地下水位90cm

** 7/30 アクチバブルトレーサー撤水直後採水

*** 中干し直後(中干し日8/1~3、8/16~18、9/2~4)、9/29水切り
——最高臭素濃度 2番目に高い臭素濃度

表4 水涵養評価式による7地点の因子および総合評価点

試験区 地 点	各 因 子 の 評 価 点 〔 〕は重み付けした評価点							総 合 評価点
	降水量** (R _{1i})	土地利用 (R _{2i})	傾 斜 (R _{3i})	土壌透水性 (R _{4i})	表層地質の透 水性(R _{5i})	空隙を有する 地層層厚(R _{6i})	地下水位 (R _{7i})	
茶 園	3 [0.63] (2,000~3,000mm)	2 [0.84]	3 [0.21] (10度未満)	2 [0.06] (10 ⁻³ ~10 ⁻⁴)	2 [0.06] (火山灰10 ⁻⁴)	3 [0.36] (50m以上)	3 [0.36] (7 m以上)	[2.52]
竹 地	3 [0.63] (2,000~3,000mm)	3 [1.26]	3 [0.21] (10度未満)	2 [0.06] (10 ⁻³ ~10 ⁻⁴)	2 [0.06] (火山灰10 ⁻⁴)	3 [0.36] (50m以上)	3 [0.36] (7 m以上)	[2.94]
茶 谷 園	2 [0.42] (1,000~2,000mm)	2 [0.84]	3 [0.21] (10度未満)	3 [0.09] ($<10^{-2}$)	3 [0.09] (火山礫 $<10^{-2}$)	3 [0.36] (50m以上)	3 [0.36] (7 m以上)	[2.37]
峨 林 (放置梅林) 地 林	2 [0.42] (1,000~2,000mm)	2 [0.84]	3 [0.21] (10度未満)	3 [0.09] ($<10^{-2}$)	3 [0.09] (火山礫 $<10^{-2}$)	3 [0.36] (50m以上)	3 [0.36] (7 m以上)	[2.28]
延 水 沢 田	2 [0.42] (1,000~2,000mm)	4 [1.68]	3 [0.21] (10度未満)	2 [0.06] (粗粒灰色 低地土)	3 [0.09] (未固結堆積 物 $>10^{-3}$)	3 [0.36] (50m以上)	3 [0.36] (7 m以上)	[3.18]
宮 水 台 田	2 [0.42] (1,000~2,000mm)	4 [1.68]	3 [0.21] (10度未満)	3 (2) [0.09] (礫質灰色 低地土)	3 [0.09] (未固結堆積 物 $>10^{-3}$)	3 [0.36] (50m以上)	3 [0.36] (7 m以上)	[3.21]
曾 水 比 田	2 [0.42] (1,000~2,000mm)	4 [1.68]	3 [0.21] (10度未満)	1 [0.03] (粗粒 グライ土)	3 [0.09] (未固結堆積 物 $>10^{-3}$)	3 [0.36] (50m以上)	1 [0.12] (3 m未満)	[2.91]

* KW=0.21R_{1i}+0.42R_{2i}+0.07R_{3i}+0.03R_{4i}+0.03R_{5i}+0.12R_{6i}+0.12R_{7i}

** 1983~1986年度の4年間の平均雨量より

表5 土壤浸透水量^{*}の推定値

試験区地点	土地利用	年間降水量 ^{**}	水田灌漑 ^{***} 期浸透水量mm	水田非灌漑期浸透水量 mm	年間浸透水量 mm	日浸透水量 mm	水涵養機能評価点
三 竹	茶 園 林 地	2,379			1,335	3.66	2.52
					1,618	4.43	2.94
谷 峨	茶 園 林 地 (放置梅林)	1,839			862	2.36	2.37
					862	2.36	2.28
延 沢	水 田	1,512	986	127	1,113	3.05	3.18
宮 台	水 田	1,512	4,540	127	4,667	12.79	3.21
曾 比	水 田	1,512	536	127	663	1.82	2.91

* 三竹、谷峨の年間浸透水量ならびに延沢、宮台、曾比の非灌漑期の浸透水量は図1より

[月間降水量(mm)－100mm]×12とした。これは100mm/月以下の降水量では1年を通じ下層への浸透が認められなかったためである。また、三竹、谷峨は平坦、かつ透水性も大きく、表面流亡は4年の間の降雨強度程度ではほとんどなかったと推定される。

** 1983～1986年の平均

*** 水田灌漑期間は5/1～9/31の150日とした。

る。宮台と延沢は不飽和浸透により大孔隙等を通じてかなり急速に垂直浸透するが、曾比は湛水期には28～37cmの宝永砂層まで垂直浸透後、同層を横浸透すると推定された（測水筒による水位は湛水期間中は約40cmであった）。

表3に、曾比の土壤水中臭素濃度の経時変化を示すが、Br⁻の最高濃度位置は中干し期には宝永砂層のほか、70～80cmの層（非灌漑期の地下水位90cmに近い）の2つに分かれる。その後は下層へ浸透することはなく、2つの層のBr⁻濃度のみが漸減しており、ゆるやかな横浸透水の通過により希釈されたと推定される。減水深法による灌漑期間中の降下浸透水量は、浸透速度の最も大きかった宮台で約4,540mmと際立って大きく、次いで延沢の990mm、曾比は540mmと小さかった。これらの値は前年度（60年）の結果とも近似している。

以上の結果により、透水性の大きい、つまり排水性のよい水田は、林地や畑等に比べて単位面積当たりの供給水量が大きいだけに水涵養機能も著しく大きいこと。しかし、排水不良の水田では供給量が大きくても浸透せず、林地や樹園地以下の水涵養機能しか有しないことが定量的に理解できる。

(3) 水浸透能実測値と水涵養機能評価点との関係

表4に7試験区の水涵養評価式（荻野ほか、1988）による総合評価点の算出結果を、表5に7試験区のアクチバブルトレーサー法と減水深法による実測値をもとに算出した年間浸透水量（水涵養量）を、総合評価点と対比させて示した。

全体的に浸透水量が大きいほど評価点も高い傾向を示すが、浸透水量の差異に比べて評価点の差はわ

ずかである。浸透水量（浸透高）と評価点の関係式（荻野ほか、前出）をみると、評価点3以下は傾きの小さい直線式で、3以上は傾きの大きい直線式であらわされている。7試験区は、評価点3.0前後が多く、浸透水量と評価点との関係を的確に表現しがたいことは事実である。しかし、延沢水田と宮台水田の評価点は3.21と3.18でほとんど等しいにもかかわらず、浸透水量では4倍も差があるなど、評価式を含め改善すべき点が少なくない。

両水田の浸透水量の大きな差は、土壌あるいは表層地質の透水性、特に中干し後のひび割れや大孔隙等による浸透水量に大きな差があることが効いていると推定される。少なくともこの点についての評価点の見直し、例えば透水性の評価点幅を大きくするなどが必要である。

4. 要約

本プロジェクトで開発したアクチバブルトレーサー法による土壌水の追跡技法を用いて酒匂川流域内の林地、樹園地および水田に7試験区を設定して、水の土壌浸透能（浸透速度や浸透量など）を、おのおの2年間にわたって計測した。さらに、各試験地の水涵養評価式による評価点を求め、実測した水浸透量との関係についても言及した。得られた主な点を以下に示す。

- (1) 土壌水追跡技法により7地点の雨水や灌漑水の浸透速度を実測することができた（例：三竹茶園200cm／年、宮台水田120cm／3日）、さらに減水深法も併用（水田）して、7地点の浸透水量も実測することができた（例：三竹林地1,200mm／年、宮台水田4,540mm／年）、いずれも土地利用や土壌の透水性、地下水位、降水量等によって、水涵養機能に大きな差があることを定量的に明らかにした。
- (2) 土壌水追跡技法により土壌中（表層から3m）での土壌水の挙動を、降水量、土層の性質や地下水位等の関連で明らかにすることができた（例：月降水量100mm以下の降水は水涵養に寄与しない。降雨時期を異にする雨水は混ざることなく平行移動的に垂直浸透する。地下水位の浅い曾比水田では、湛水期は28～37cmの宝永砂層まで、中干し期は70～80cmの地下水面表層まで垂直浸透した後ゆるやかに横浸透する）。
- (3) 7地点の年間浸透水量が大きいところほど水涵養評価式（水涵養量）による総合評価点も高い傾向を示した。しかし、評価点より実際に近い水涵養量を選出する数式を導くには、評価式やその評価点幅など改善すべき点が少なくない。

5. 参考文献

- 荻野喜作、横山尚秀、結田康一、小前隆美（1987）、水涵養機能の評価と整理、「農林水産業のもつ国土資源及び環境保全機能の定量的評価」研究報告（第2集）、34-37。
- 結田康一、渡辺久男、木方展治（1985）、アクチバブルトレーサー法による土壌水の追跡技法、国土資源資料 No.13、P.63～82。