

浸透基盤における雨水の挙動に関する実験的研究

Experimental Study on Infiltration basin at University of Tokyo

東京大学工学部都市工学科
市川 新・慶長寿彰・原田茂樹・横山道子
日本電気(株) 山本唯夫

1. 研究の目的

雨水を流出させる前に浸透・貯留させ、流出の集中化を遅らせその結果ピーク流量を低減させる事が河川サイドや下水道サイドから提案されるようになって来た。このような雨水流出抑制は総合治水事業とか、雨水流出抑制型下水道と言われて、1部地区で試験的に実施されているが、その効果の定量法や評価法については、ほとんど確立されていない。その理由として、これ等の施設が面的に分布する事と、雨水の挙動が定量的な解析が困難な地下である事があげられている。本研究ではこれ等の問題点を明らかにすべく浸透基盤を

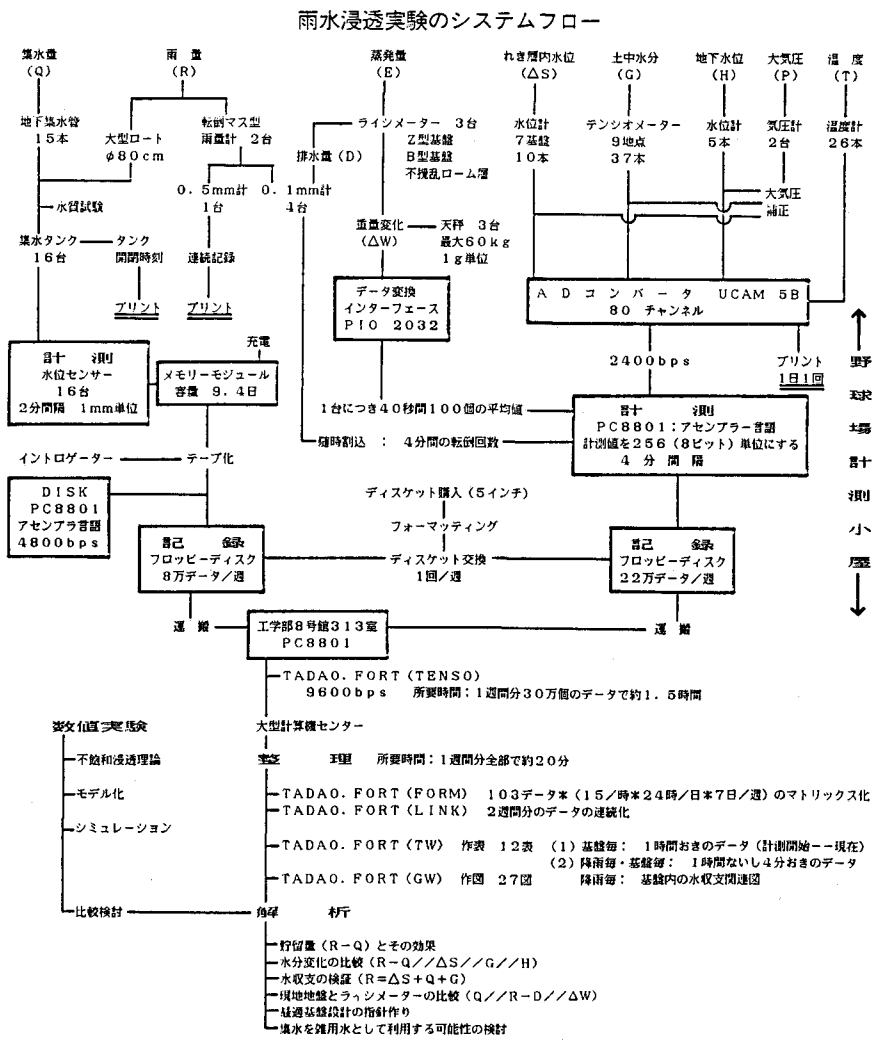


Fig 1 Flowsheet of Measuring System for Quantitative Analysis for Infiltration

設置し、かつそこで起る水文現象を記録するためデータ計測とそのデータ管理のソフトウェアを開発した。またそのデータの解析に必要な小規模な実験施設を併せて設置した。その概要については、1984年の水理講演会で報告したので参照されたい。

実験基盤を 12 m × 21.5 m とし雨量・蒸発量・基盤内水位・土中水分・浸透量・地下水位・基盤温度を夫々4分間隔で測定している。システムのフローを図1に示す。

2. 透水性舗装基盤の貯留能力

本研究施設では各種の水分量を測定しているので、基盤内に貯留された雨水量を直接推定する事が出来る。即ち降雨量と基盤から流出する排水量の差がなんらかの形で基盤の中に貯留された量と考える事が出来る。基盤の下層すなわち在来地盤と透水基盤との境界に遮水シートが張られている場合はこの差全部が基盤内に貯留されたものである。一方遮水シートのない場合は、基盤内に流入した降雨の1部が、在来地盤に浸透する。もしシートの有無だけが異なる基盤があれば、両者を比較する事により在来地盤への浸透量を推定することが出来る。更に一定の期間を置いた降雨記録がある時は、前の降雨の際基盤に浸透した雨水が後の降雨の浸透に影響を与える。特に遮水シートのある場合基盤に浸透した水は、排水管を通して排除されるか、シートや、周辺に打ち込まれた遮初板（亜鉛鋼管）の継ぎ手から洩れるか、蒸発して大気中に出て行くかいずれかである。何らかの方法で蒸発量が測定出来れば、この方程式を解く事が出来る。

表-1は 1985 年の台風6号(6月30日から7月1日まで総降雨量 137.9mm)の時の各基盤内の貯留量の最大と最終値を示したものである。

表1 台風時(総降雨量 137.9 mm)の各基盤の貯留量

基盤名	遮水シート	れき層厚 cm	集水量 mm	貯 留 量 (mm)	
	%			最大	最終
B	100	10	15.7	122.6	122.2
C	100	25	73.2	74.4	64.7
Z1	0	30	31.9	112.6	106.0
Z2	100	30	74.0	72.8	63.9
Z3	0	30	30.5	107.4	107.4
X2	100	30	35.3	102.6	102.6
Y1	20	30	16.4	121.5	121.5
Y2	40	30	17.2	120.7	120.7
Lycimeter B		10	128.3	22.4	9.6
Lycimeter F		50	112.3	26.4	25.6
Lycimeter Z		5	107.1	31.3	30.8

この表の中には目詰りが起きていたり、センサー等の故障のため欠測となっているものは除いている。C・Z2基盤の集水量はほぼ同じ値を示しており、これで見ると限りでは基盤厚の差 5 cm は集水量に影響を与えていない事が解る。この傾向はこの雨に限らずほとんど全ての降雨に当てはまる。この場合基盤内の最大貯留量はC・Z2で夫々 74.4, 72.8 mmであり、基盤内の 18.6, 15.1 % (アスルト・れき・砂の厚さを加えた全厚で除した)に相当している。降雨終了後集水管からの流出が止った後の貯留量は共に 9 mm である。

Z1基盤は遮水シートがないだけで、Z2基盤と同じ構造をしている。データの再現性があうとすると、2つの基盤の集水量の差は、遮水シートの効果と考えられる。この仮説が成立つとすると 42.1 mm (74.0 - 31.9)が浸透基盤から在来基盤へ浸透したか、両者の境界に貯留されていたものと思われる。Z3はZ1と同じ基盤であるが、在来基盤に砂を混ぜ、透水係数を大きくしたものである。この結果からだけでは、透水係数が大きくなった分だけ集水量が小さくなっているように見える。もしこの仮説が正しいとしても、両

者の差が小なので地盤改良の効果は認められていない事になる。

Y1・Y2基盤は遮水シートを基盤全面に置かず、中心部にのみ設置したものである。これによると集水量はZ1・Z3よりも小さく水の行方が解けない構造となっている。

図1はZ2基盤の集水量を降雨毎にプロットしたものである。aは横軸に降雨量・縦軸に集水率（集水量／降雨量）を取ったものである。この図から集水量と降雨量の関係を読みとる事は困難である。bはaの中から今年度の降雨についてのみ取り出したものである。

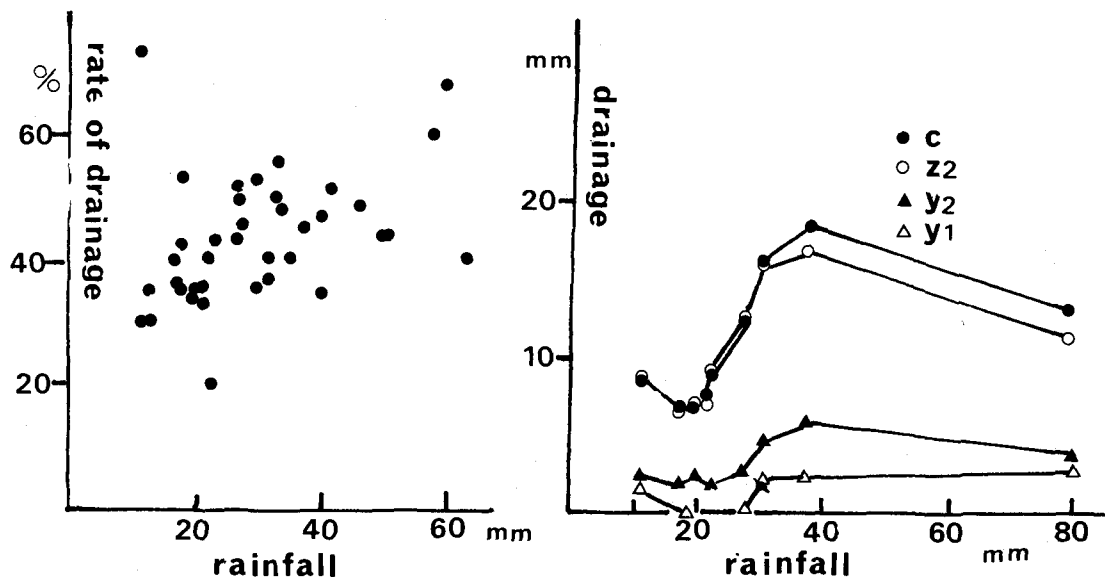


Fig 2 Volume of Drainage from Infiltration Basin

3. 蒸発量の測定

3-1 測定装置

蒸発量の測定方法は農業水文学者を中心にして数多く提案され実施されその成果が発表されているが、夫々に問題点を含んでいる。以下にその方法と問題点を述べる。

1) 水収支法： 水収支式から計算で求める。これは長期間の蒸発量を求めるのに適するが短期間の蒸発量の変動を求める事は出来ない事と、水収支式そのものの仮定に問題点が残されている。

2) ライシメーター法： この中を更に、質量法、水収支法、水分補給法等に分けられる。この方法により蒸発量の時間変化を追う事が出来るがそのハードウェアが確立していない。

3) 蒸発計法： 気象資料として観測されているものである。1966年以前は径20cmの小型蒸発計を使用していたが、1966年移行は径120cmの大型蒸発計により測定されている。これは常に水面がある状態での蒸発量なので、土ないし畑からの蒸発量に換算する方法が確立していない。

4) 部屋法： 対象とする土地の上部をビニール製のテントを張りその部屋に出入りする空気中の水分（湿度）の差から蒸発量を推定する。この方法は自然状態と異なる事と空気中の水分測定法（多くの場合乾湿球の温度差から求める）の精度が粗い事からあまり行なわれていない。

以上の方法を検討し、かつ現在の測定技術やエレクトロニクスの進歩を勘案して、本研究では2のライシメーターの質量法をにより測定する事とした。以下にその設備を示す。

1) 質量計： 質量法の最も根幹をなす所である。質量計として求められる条件は、a) 出来るだけ大質量が測定出来る事、b) 最小測定単位が小さい事、c) 計測が電気信号である事、が上げられる。aの条件が満足出来れば、上に載せるライシメーターを大きくする事が出来その結果側壁の影響を小さくし精度の高い観

1) 質量計：質量法の最も根幹をなす所である。質量計として求められる条件は、a) 出来るだけ大質量が測定出来る事、b) 最小測定単位が小さい事、c) 計測が電気信号である事、が上げられる。a) の条件が満足出来れば、上に載せるライシメーターを大きくする事が出来その結果側壁の影響を小さくし精度の高い観測が可能となる。b) は直接測定精度に関係するもので小さければ小さい程望ましい。c) は計測を連続して行なう時には必須の条件である。a) b) のみに限れば米屋で使用されている秤が条件を満足していると考えられるが、計量値を記録するために、人手を要しかつ連続的に記録する事は短時間なら可能としても長時間は不可能である。特に降雨時に測定する事を予測した場合には、この方法では無理である。しかし最近電子天秤と言われる出力を電気信号化された天秤が開発され、その装置が a) b) 型の天秤に取り付けられるようになっていた。1983年当時最大秤量 60 kg 最小測定単位 1 g のものにこの装置が取り付けられていた。この天秤は貴金属店・薬品会社・化粧品会社等の用途に開発されたものであるが、これ等の事業所では、必ずしも連続測定の必要はなく、電気信号利用のためのソフトはほとんど利用されていなかった。

2) ライシメーター：透水性舗装の厚さが 30-50 cm なのでライシメーターの高さも最低 50 cm とした。この条件と砂れきの比重を 2.65 とし合計の質量を 60 kg とすると、ライシメーターの可能最大表面積は 450 sqcm となり、20 cm 角のライシメーターを用いても測定可能となる。そこでこの大きさのライシメーターの型枠を塩化ビニールで作製し、目的に応じそれに各種の土・砂・れきを詰めて計測用ライシメーターを作製した。透水性舗装と同じ構造のライシメーターの場合は、下から砂・れき・アスファルトの順に圧密しながら詰めたので実際のものに対応させる事が出来た。しかしその圧密度を計画通りにする事は出来なかった。

自然の土の場合土を攪乱すると、条件が完全になってしまうためその作製には特別の配慮を行なった。最初にライシメーター用型枠として 20 cm 角で 17 cm の高さで底なしの角柱を 3 個と底板を作った。一方平坦な地表面を選び中心部に直径 1 m の土柱が残るように周辺の土を掘り出した。実際には、東京大学構内の図書館前の発掘調査現場の法面を利用し約 2m の半円を掘り出した。この円錐状の土からカッターとこてで

20 cm の角柱（土柱）に削り上げ、それに上から上記の型枠を被せた。尚最下段の型枠には排水用のパイプを取り付けておいた。3つの型枠を全部かぶせた後で、土柱の底面を水平に切り底板を入れてライシメーターを完成させた。尚型枠の間や、底面と型枠の間は補強材と接着剤を用いて固定し水洩れを防ぐと共にライシメーターの構造の補強を行なった。その際に型枠と土柱との間に隙間があれば、採取現場の土を充填した。採取現場は関東ローム層であり、表面に草が生えており、その根はライシメーターの底部にまで達していた。

このライシメーターは図のように 高さ 20 cm のコンクリートの台の上に置かれた天秤の上に置かれている。ライシメーターの上面は屋根を被せ雨水が天秤に掛らないようにしたが、重さを計る関係からライシメーターと屋根の間に隙間を設けざるを得ず、完全に雨を遮断する事が出来なかった。このライシメーター置場全体は約 1.5 sqm あり周囲をベニヤ板で囲い、風や直射日光の影響を除くようにしている。

3) 計量システム：天秤から総重量をグラム単位でカレント・ループで 0.4 秒間隔で送信されているので、これを普及型のパーソナル・コンピュータで 40 秒間受信しその平均値をその時の値として記録する。実際には3台の天秤を用い3種のライシメーターを計測するので、1台当りの計測間隔は4分となる。受信されたデータは5インチのフロッピーディスクに書き込みパソコンないし大型計算機を用いて解析を行なっている。

3-2 測定結果

図-2は測定結果の1部を1時間間隔でプロットしたものである。a-dは関東ローム（自然状態）の蒸発量である。夫々のグラフは降雨直後からの重量の変化をプロットしたものである。100 gの重量の減少は約 2.5 mm の蒸発に対応する。関東ロームの場合約1200 g保水能力（これは 30 mm に対応し土層厚 1 cm 当り 0.6 mm に相当する）があり、それが長時間徐々に蒸発により減少している事がわかる。かつその蒸発

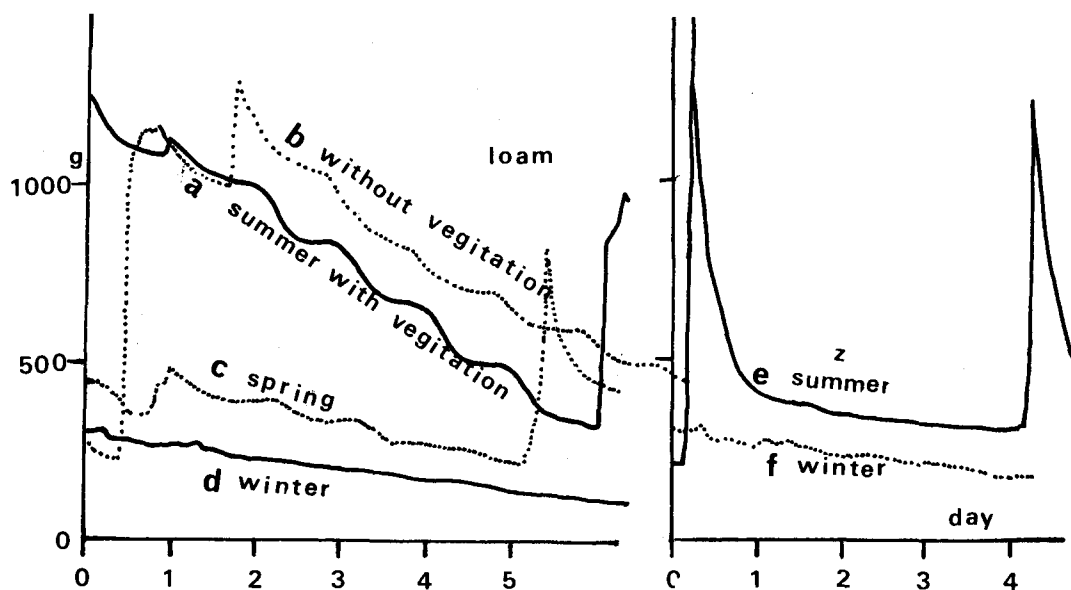


Fig 3 Measurement of Evaporation on Lysimeters

量は日単位で見ると図中に示したように直線で近似出来、約1週間その減少傾向が続き、蒸発が基盤表面からだけでなくライシメーターの全部の深さから根を通じて行なわれている事が推測される。その速度は夏期・春季・冬期で夫々3.81, 1.18, 0.63 mm/d となっている。夏期の値は自然状態での値でありこの時期にはライシメーター全面に雑草が生えており蒸発散量を含んだ数値である。その後この雑草を全て刈り取って蒸発量を測定したのが、bである。この時刈り取った草の質量は 34 g であり、乾燥後の質量は 8.4 g (草の含水率は 75.6 %) で、草の全表面積は 2488 sqqcm (草乾燥質量当り表面積は 296 sqcm/g) であった。この場合草は除去したが根はそのまま残されている。これによると、蒸発量の日間変動のパターンは草の存在の有無にほとんど差がないが絶対量は 2.72 mm/d となっていた。この差 1.09mm/d が葉面からの蒸発散量と言えよう。

図e-fは透水性舗装基盤を詰めたライシメーターの蒸発量の変化を示したものである。このライシメーターの基盤厚は 30 cm であるが、構造上突き固めが困難であったので実際に施工されている透水性舗装の締め固め度と同じとする事が出来なかった。図eは、夏期の蒸発量を調べるため 1 L (25 mm の降雨に対応) の水をまいた時のライシメーターの重量変化を示したものである。これによると関東ロームとれき層とが際だった差異がある事を示している。即ちれき層の場合保水能力がほとんどなく降水の全てが降雨中ないし降雨直後に流出してしまうため蒸発量そのものが小さくかつその速度も小である。夏期でも 0.63 mm/d であり、図fの冬期では 0.49 mm/d となっている。

図eで示された基盤の保水能力から透水性舗装は極めて排水性能がよく、約1日で基盤の初期状態に戻り次の降雨の浸透が可能な状態となっている事が解る。一方関東ローム層の場合は初期の状態に戻るのに約1週間かかるので、浸透可能量を推定する場合には「先行降雨」を考慮せねばならない事が解る。但し、実際の透水性舗装からの流出量は、表2に示したように総降雨量の 40-60 % の範囲であり、ライシメーター程流出(排水)されていない。これは実験に用いたライシメーターの圧密度が実際の基盤よりも小さく、その結果砂およびれきの毛管圧が小さかったためではないかと考えている。実際の場合透水性舗装の基盤内に入った降水が基盤下層の砂層にたまり圧密された砂の毛管圧により保水されているのではないかと考えられる。その結果降雨後1日以上経過すると、透水性舗装の上層基盤の保水量が小さくそこで次の降雨を浸透させる事が出来るようになる。この仮説は各基盤からの排水量の記録と一致する。

4. 土中水分

4-1 土中水分の測定： 土中水分の測定法としてテンシオメーターによるもの、中性子水分計によるもの等様々な方法が提案され実施されているが、いずれも一長一短である。テンシオメーターの問題点としては、1) 計器の埋設場所ではしか計測出来ない、2) 測定は吸引圧なので水分に換算するため $pF-Q$ 曲線を埋設場所近傍の土で作製しておかなければならない、3) この $pF-Q$ 曲線はヒステリシス（脱水過程と吸引過程）があり同じ圧でも水分が異なる、4) 埋設時のボラス・カップ内の圧力お絶対値の決定が困難でありその結果 $pF-Q$ 曲線の適用に際し誤差を含む、5) 吸引圧の変化に対しテンシオメーターの測定感度（時間遅れ）が明らかでない、等が上げられている。それ等の原因により現在利用可能なテンシオメーターは水分の上昇に基づき起る土砂崩れを予測するような水分量の変化の大きな所での計測には適しているが、本システムのように4分間隔に水分量を追跡するような場での計器の有効性の検討がなされていなかった。

中性子水分計は $pF-Q$ 曲線に対応するようなキャリブレーション曲線（表）を作製しなければならないが、測定が水素である事からその曲線の適用範囲が大きく一度作製すれば、かなり長時間かつ多くの場所の測定に用いる事が出来ると言われている。しかし計測には観測井が必要でありテンシオメーターと同じく測定場所が限定される、連続測定が出来ない事、取りあつかいに注意を払う必要がある事等の問題点がある。

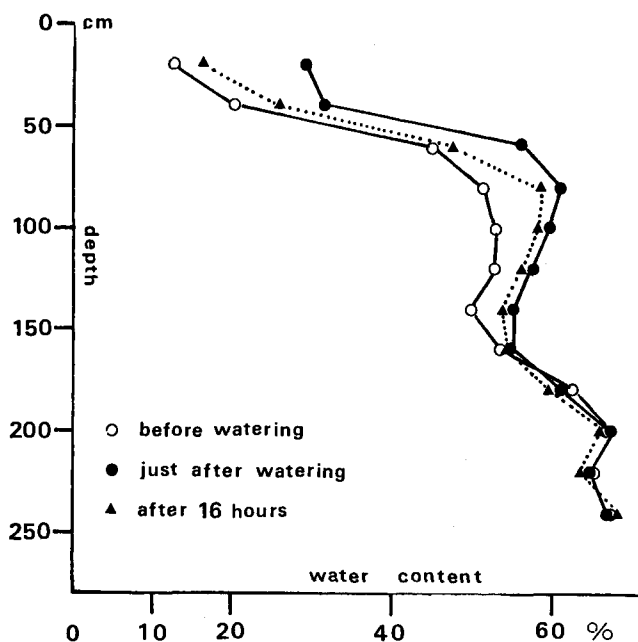


Fig 4 Water Contents at Sub-Surface Strata

図-4は散水実験の際の水分の変化を示したものである。散水量の記録はあるが、その平面部の状況が明確でないため、Input-Output の関係を見る事は出来ないが、水分変化の実態は読みとる事は可能である。○印は散水前の状態、●印は散水直後の状態、▲印はその12時間後の状態を示している。この散水の場合浸透は120 cmの所までしか浸透していないと読みとれる。地表面の水分量は増加しているが80 cmの所よりも小さな値となっている。これは、水分量が線源から約20 cmの半径の平均値を示しており、地表面の場合大気中の値も入れた形での平均を取っているためと思われる。しかし約12時間後には水分は大幅に減少している。この減少分が蒸発なのか、下方への浸透なのか、横方向への浸透なのかこれだけのデータからでは判断する事は出来ない。

5 今後の課題

ここに示した蒸発量の測定結果はほんの1部であり、このデータの宝庫から読み取るべき現象は極めて大きいものと考えている。その1つとして、蒸発の機構を解明しそれに関係する因子を取り上げ、その影響を定量的に記述する事を考えている。農業水文学の分野で取り上げられている因子は、日照量・湿度・大気温度・風向・風速・土の湿り度等であり、その多くは気象庁の定期観測資料に含まれているので、最初にマクロ的に因子分析を行ない、次いでその定量化を試みていきたい。その過程においてより詳細な情報が必要となれば、この計測システムの中に必要な項目の計測を行なえるように組み込んでいきたい。