

ろ紙による降水粒子の質量測定の精度について*

佐 粧 純 男・森 太 郎・小 野 崎 統
齋 藤 貴 志・筒 井 憲 司**

要 旨

ろ紙による降水粒子の質量測定に必要な痕跡面積対質量の変換式を求め、ろ紙法の精度について吟味した。ろ紙の痕跡面積の測定は、画像解析器で行った。使用したろ紙は、東洋ろ紙株式会社の定性分析用 No. 1 である。16本のロール状ろ紙から、ろ紙片 (15 cm×50 cm) を切り取り検定した。検定は 0.2 mg~12.0 mg の質量範囲から選んだ9組の水滴について行った。各質量について計80個以上の痕跡面積を読み取り、平均痕跡面積および痕跡面積のばらつき頻度分布を求めた。これをもとに、平均痕跡面積対質量の変換式、ろ紙による質量測定精度について考察した。結果は以下のようにまとめられる。

1) 平均痕跡面積 S (mm^2) と質量 m (mg) の関係は 1 mg を境に二つの異なる直線で近似される。最小自乗法で求めたそれぞれの変換式は

$$m=0.043 S \quad 0.1 \text{ mg} \leq m \leq 1.0 \text{ mg} \quad (1)$$

$$m=0.07 S - 0.635 \quad 1.0 \text{ mg} < m \leq 12.0 \text{ mg} \quad (2)$$

である。

2) ろ紙の痕跡面積は、同じ質量でもかなり大きなばらつきがあり、最大ばらつき幅は質量と共にほぼ直線的に増加した (第1図)。

3) 質量 m の水滴を N 個測定したとき、ろ紙の痕跡から換算した質量が $(m \pm \Delta m/2)$ に入る水滴の割合をもって、区間 Δm に対する精度と定義した。ろ紙の精度を 80% 以上に保つためには、1 mg 以下の水滴の場合、質量区間 $\Delta m=0.1$ mg, 1 mg~10 mg の場合 $\Delta m=1.0$ mg, 10 mg 以上の水滴で $\Delta m=1.5$ mg 以上にとる必要があった。このことは、粒径精度を同程度に保つためには粒径区間 ΔD を 0.2 mm 以上に取らなければならないことを意味している。

4) 10 mg 以下の降水粒子の痕跡がひろがりきるまでの時間は、ほぼ2分である。したがってろ紙による質量自動測定装置を計画する場合、粒子採集後読み取りまで少なくとも2分程度の猶予時間を考えておく必要がある。

1. 序

降水粒子の質量測定法の一つとして、ろ紙法がある。ろ紙法は多数の粒子を同時に簡単に採集出来るうえに、雪粒子の質量測定も可能な点で広く使われている (例え

ば, Imai *et al.*, 1955, Gunn and Marshall, 1958, 中村, 1960, など)。しかし、データの処理にかなりの労力と時間が必要なために、降水粒子の質量測定は主に調査・研究の分野に限られていた。一方、最近の画像解析器の発達は、この種のデータを多量に、しかも短時間で処理することを可能にした。これに伴って、降水粒子の質量に関するデータの新しい解析法や利用法の開発が期待できるようになった。この機会に、ろ紙法の測定精度について再考することは、必ずしも無駄ではあるまい。

ろ紙法で降水粒子の質量を測定する場合、観測者がそれぞれ使用するろ紙について平均痕跡面積対質量の変換

* On the Accuracy of the Method for Measuring the Mass of Precipitation Particles by using Filter Paper

** Yoshio Sasyo・Taro Mori・Osamu Onozaki・Takashi Saito・Kenji Tsutsui, スガ試験機株式会社 技術開発部第二課。

—1989年3月20日受領—

—1989年11月10日受理—

第1表 検定結果のまとめ

1	質量 (mg)	0.1	0.2	0.6	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
2	平均痕跡面積 S (mm ²)	2.4	4.8	13.7	21.3	38.1	66.0	101.0	123.0	144.0	182.0
3	最大痕跡面積 S _{max} (mm ²)	4.0	6.0	16.0	25.0	49.0	80.0	112.0	138.0	164.0	205.0
4	最小痕跡面積 S _{min} (mm ²)	2.0	2.0	11.0	18.0	27.0	58.0	87.0	108.0	124.0	167.0
5	痕跡面積の最大ばらつき幅 δ (mm ²)=S _{max} -S _{min}	2.0	4.0	5.0	7.0	22.0	22.0	25.0	30.0	40.0	38.0
6	痕跡面積の標準偏差 σ (mm ²)	0.7	0.7	1.2	1.5	3.7	3.1	5.3	6.4	7.2	9.9
7	変換式による逆算質量 S' (mg)	0.1	0.2	0.6	1.0	2.0	4.0	6.4	8.0	9.5	12.1
8	ろ紙の測定精度 A (%)	80	93	78	75	93	87	85	82	74	67

*0.1 mg の結果は1日データのものである。但し検定法は同じである。

式を求め、その精度は痕跡面積のばらつき標準偏差から推定するのが普通である。しかし、著者の知る限りこれらに関する議論は、ほとんど論文に現れていない。特に精度に関しては、ろ紙法について述べた論文(例えば、Niedeldorfer, 1932, 高橋, 1943 など)でさえも、平均痕跡面積の周りに標準偏差の幅をもたせる程度でしか扱われていない。

標準偏差(σ)は、ばらつき確率分布関数に関係なく、観測値が決められた幅($>\sigma$)に入る確率の下限を与える量として重要である。しかし、逆に一定の確率で測定値を含むようなばらつき幅、すなわちろ紙法の精度(後述)を決めるには、ばらつき確率分布を具体的に知る必要がある。この意味で、ろ紙の痕跡面積のばらつきに対する頻度分布をもとに、精度を吟味した。

2. 検定法

使用したろ紙は東洋ろ紙株式会社製の定性分析用 No. 1 のロール(15 cm×50 m)で、平均重量 90 g/m²、平均の厚み 200 μ m である。ろ紙の色素処理にはアエリンブルーを使った(丸山, 浜 1954)。一定質量の水滴は、1 μ l, 100 μ l 用のマイクロシリンジで作った。検定した水滴質量は、1 mg 以下のものでは、0.2 mg, 0.6 mg, 1.0 mg の3組、1 mg 以上では 2 mg, 4 mg, ……12 mg と 2 mg 毎の6組で、計9組である。各ろ紙から長さ 50 cm の試験片を切り取り、それぞれに同一質量の水滴を5個以上滴下し、各質量当たり計80個以上の痕跡を作った。マイクロシリンジの目盛りは実体顕微鏡下で読み取った。

データの処理は画像解析器で行った。各ろ紙毎に痕跡面積、標準偏差を求め、更に16枚のろ紙全体についての

平均痕跡面積、標準偏差を求めた。

3. 結果

3.1 痕跡面積と質量の変換式

得られた結果は第1表にまとめた。同表第1行目から順に、検定した水滴の質量 m (mg)、平均痕跡面積 S (mm²)、最大痕跡面積 S_{max} (mm²)、最小痕跡面積 S_{min} (mm²)、痕跡面積の最大ばらつき幅 δ (mm²)=S_{max}-S_{min}、ばらつき標準偏差 σ (mm²)、7行目以降はその都度説明する。

痕跡面積の最大ばらつき幅 δ は第1図に示すとおり、質量と共にほぼ直線的に増加していた。

第2図に平均痕跡面積と質量の関係を黒丸で示した。最小自乗法で変換式を求めると、0.1 mg を境にして2つの変換式

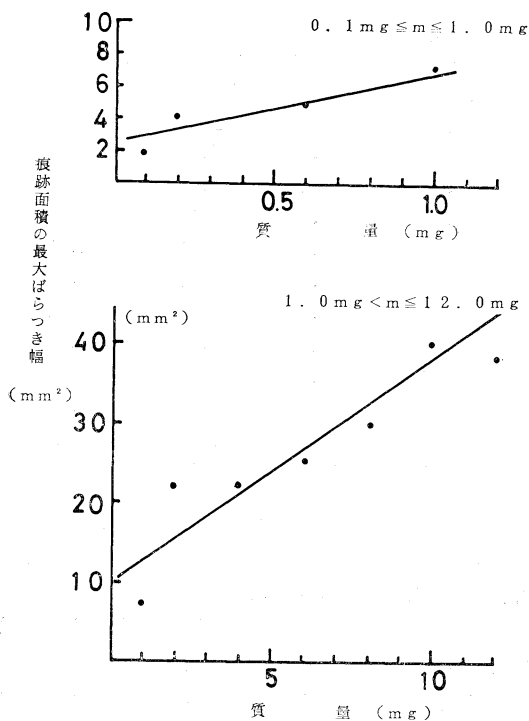
$$m=0.043 S \quad 0.1 \text{ mg} \leq m \leq 1.0 \text{ mg} \quad (1)$$

$$m=0.07 S - 0.635 \quad 1.0 \text{ mg} < m \leq 12.0 \text{ mg} \quad (2)$$

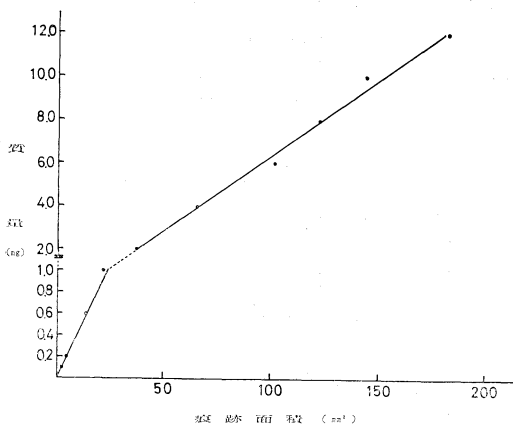
を得る。これらの変換式は第2図に実線で示してある。変換式の適合度は、各式に平均痕跡面積を代入し、質量を逆算して、求めることが出来る。逆算した質量は、第1表7行目に示したとおり、同表1行目の質量とよく一致し、変換式として十分な精度を持つと言えよう。ここで0.1 mg の水滴の検定はまったく同じ方法で行った前回の結果を使っている。

3.2 ろ紙法の精度

変換式(1)、(2)は既にのべたとおり、平均痕跡面積と質量の関係を示したもので、個々の痕跡面積は第1表の第2~4行に示すとおり広くばらついている。このばらつき頻度分布を第3図に例示した。横軸が痕跡面積、縦軸が全個数で規格化した頻度である。ヒストグラ

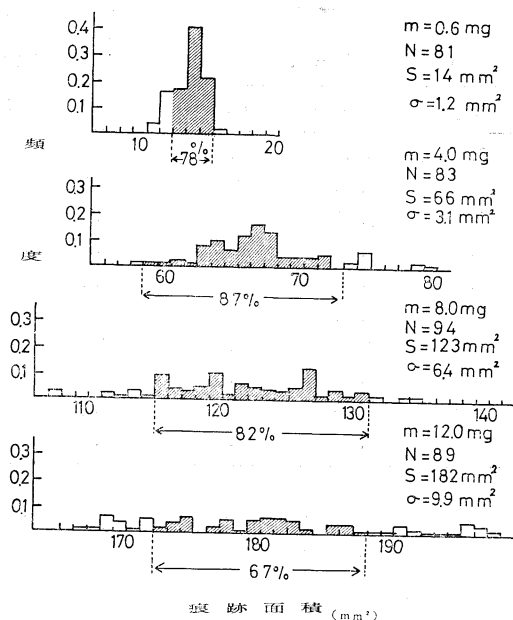


第1図 疫跡面積の最大ばらつき幅と質量の関係。



第2図 平均疫跡面積と質量の変換図。

は上から 0.6 mg, 4 mg, 8 mg, 12 mg のものである。各ヒストグラムの右側には検定した水滴の全数 N , 平均疫跡面積 S , 標準偏差 σ が示してある。特に, 8 mg 以上のヒストグラムはほとんど一様分布と見なせるほどフラットで幅の広い分布になっている。しかし, われわれが降水粒子の質量を扱う場合, 質量を Δm mg 毎に区



第3図 疫跡面積のばらつき頻度分布。頻度は全個数で規格化してある。

切り, $m - \Delta m/2 \sim m + \Delta m/2$ のばらつき範囲に入る粒子をまとめて, m mg の粒子とするのが普通である。したがって, 痕跡のばらつきが質量に換算して Δm 以内であれば, このばらつきは精度に影響しない。

話を具体的にするため, 雪片用含水率計を例に述べよう。含水率計では画像解析器がろ紙の痕跡を読み取り, 変換式 (1) または (2) によって, 雪片に含まれる水および雪片の全質量を計算し, 小数2位を四捨五入してプリントアウトする。この場合 $\Delta m = 0.1 \text{ mg}$ である。更に整理の段階で 1 mg 以上は, 小数1位を四捨五入して $\Delta m = 1 \text{ mg}$ 毎に質量を組分ける。これらの質量区間に対応する痕跡面積区間 ΔS は, それぞれ $\Delta S = 2.3 \text{ mm}^2$, $\Delta S = 14.3 \text{ mm}^2$ になる。したがって, 痕跡のばらつきがこの区間内であれば, 総て同一質量 m mg の粒子として扱われる。この意味で $\Delta S = 2.3 \text{ mm}^2$, $\Delta S = 14.3 \text{ mm}^2$ を質量区間 0.1 mg および 1 mg に対するばらつき許容範囲と考えることが出来る。各質量に対するばらつき許容範囲は, 第3図のヒストグラム上で影をつけて示した。当然のことながら, 頻度分布の上で許容範囲の占める面積の割合が大きいくほど精度が高いと言える。今, 質量 0.6 mg のヒストグラムを例にとると, 平均疫跡面積 14 mm^2 を中心に許容範囲は 13 mm^2 (0.55 mg) ~ 15 mm^2 (0.64 mg) で, ヒストグラム全体の78%を占めて

第2表 粒径精度80%にたいする粒径区間

$m \leq 1 \text{ mg}$ ($\Delta m = 0.1 \text{ mg}$)			$1 \text{ mg} < m \leq 10 \text{ mg}$ ($\Delta m = 1.0 \text{ mg}$)			$10 \text{ mg} < m$ ($\Delta m = 2.0 \text{ mg}$)		
m mg	D (mm)	ΔD (mm)	mmg	D (mm)	ΔD (mm)	mmg	D (mm)	ΔD (mm)
0.1	0.58	0.19	1.5	1.42	0.32	11.5	2.80	0.16
0.2	0.73	0.12	2.0	1.56	0.26	12.0	2.84	0.16
0.3	0.83	0.09	3.0	1.79	0.20	14.0	2.99	0.14
0.4	0.91	0.08	4.0	1.97	0.17	16.0	3.13	0.13
0.5	0.98	0.07	5.0	2.12	0.14	18.0	3.25	0.12
0.6	1.05	0.06	6.0	2.25	0.13	20.0	3.37	0.11
0.7	1.10	0.05	7.0	2.37	0.11	22.0	3.48	0.11
0.8	1.15	0.05	8.0	2.48	0.10	24.0	3.58	0.10
0.9	1.20	0.04	9.0	2.58	0.10	26.0	3.68	0.10
1.0	1.24	0.04	10.0	2.67	0.09	28.0	3.77	0.09

いる。言い換えると、質量 0.6 mg の水滴 N 個をろ紙法で測定したとき、N 個の78%は 0.6 mg の粒子として扱われ、残りの22%は 0.5 mg (このヒストグラムでは20%にあたる)と 0.7 mg (ここでは2%)の粒子として測定されて誤差になる。この意味で頻度分布の上で許容範囲の面積の占める割合を、ろ紙の精度と呼ぶことにする。他の質量の粒子についても同じように精度を求めることが出来る。この精度が第3図の横軸および第1表8行目に示してある。

痕跡の許容範囲が質量区間の幅で決まるのに対し、痕跡のばらつき幅は質量と共に増加する。したがって、質量区間 Δm を一定にしておく限り、精度は質量と共に悪くなる。質量全域に対して精度を一定に保つためには、質量の増加に合わせて質量区間 Δm を大きくし、許容範囲を広げる必要がある。事実、第1表でも1 mg より軽い領域と重い領域のそれぞれで、精度が質量と共に90%台から70%台まで減少している。特に、12 mg の精度は60%台までおちている。以上結論として次のように言えよう。

$m \leq 1 \text{ mg}$ の水滴に対して $\Delta m = 0.1 \text{ mg}$ 、 $1 \text{ mg} < m \leq 10 \text{ mg}$ に対して $\Delta m = 1.0 \text{ mg}$ とすれば、ろ紙の精度は平均してほぼ80%以上になる。また10 mg 以上の水滴に対して同程度の精度を保つためには、質量区間 Δm を1.5 mg~2.0 mg と粗くしなければならない。

この結論は適当な変換式を用いて、いろいろな量の精度に書き換えられる。例えば、

$$\Delta D = \Delta m / \{(\pi/2)(6m/\pi)^{2/3}\} \quad (3)$$

によって、質量に対する等価球の粒径精度に変換出来る。第2表は80%以上の粒径精度に対応する粒径区間

ΔD を示したものである。この表から、例えば質量0.5 mg ($0.45 \text{ mg} \leq D < 0.55 \text{ mg}$) の水滴の等価球は直径0.98 mm ($0.95 \text{ mm} \leq D < 1.02 \text{ mm}$) であって、粒径区間 ΔD を0.07 mm 以上にとれば、質量精度と同じ意味で80%以上の粒径精度が得られる、しかし0.2 mg の水滴で、同じ精度を保つには粒径区間 ΔD を0.12 mm 以上にとらなければならないことが分かる。また同表から、粒径区間を0.2 mm にとれば2 mg 領域で若干精度が落ちるが、そのほかの粒径領域で精度を80%以上に保つことが出来ることも分かる。

3.3 ろ紙の痕跡面積の広がり速度

ろ紙法で降水粒子の質量を連続かつ、リアルタイムで測定する場合、採集した粒子の痕跡が充分広がりきった後に面積の読み取りをしなければならない。したがって痕跡がひろがりきるまでの時間をあらかじめ知る必要がある。このために痕跡の広がりを一定時間毎に撮影し、痕跡面積の増加が止まるまでの時間を求めた。結果は第3表に示した。この表から10 mg 以下の水滴の痕跡は2分以内ではほぼ完全に広がりきるが、20 mg 程度の水滴の痕跡が完全に広がりきるまでには、約3分以上が必要であることが分かる。しかし大部分の降水粒子の質量はせいぜい10 mg~15 mg のものが普通で、20 mg もの粒子はごく希にしか観測されない。したがって、降水粒子の質量を自動的にリアルタイムで測定する場合、粒子採集後から痕跡読み取りまで、少なくとも2分程度の猶予時間を考えておく必要がある。

4. まとめ

一定質量の水滴が作るろ紙の痕跡面積を画像解析器で

第3表 痕跡面積の広がり速度

時間 \ 質量	6.5 mg	11.1 mg	22.3 mg
30 sec	92 mm ²	142 mm ²	293 mm ²
60	100	156	294
90	101	—	—
120	101	166	315
150	101	—	—
180	102 (6.5 mg)	168	322
300	100	168 (11.1 mg)	327
600	101	—	327 (22.3 mg)

測定し、水滴質量と平均痕跡面積との変換式を求めた。また、痕跡面積のばらつきの頻度分布から、ろ紙法の精度を吟味した。

東洋ろ紙株式会社製の定性分析用 No. 1 に対して変換式は

$$m = 0.043 S \quad 0.1 \text{ mg} \leq m \leq 1.0 \text{ mg} \quad (1)$$

$$m = 0.07 S - 0.635 \quad 1.0 \text{ mg} < m \leq 12.0 \text{ mg} \quad (2)$$

であった。

質量 m mg の水滴を N 個測定したとき、痕跡から換算した質量が $(m \pm \Delta m/2)$ に入る水滴の割合を区間 Δm に対するろ紙の精度と定義すると、平均精度を80%以上に保つためには、質量 1 mg 以下の水滴に対し $\Delta m = 0.1$ mg, 1 mg~10 mg に対し $\Delta m = 1$ mg, 10 mg 以上に対して、 $\Delta m = 1.5$ mg~2.0 mg にとる必要があった。これは、粒径精度に換算すると粒径区間 ΔD を 0.2 mm 以上にとることに相当する。

10 mg 以下の降水粒子の痕跡が広がりきるまでの時間はほぼ2分であった。したがって痕跡の読み取りには、粒子採集後少なくとも2分程度の猶予時間が必要であることが分かった。

5. 吟味

ろ紙の痕跡のばらつき幅はかなり大きく、その頻度分布はフラットで、いわゆる実験誤差を越え、ろ紙の質量測定精度は必ずしもよいとは言えない。このばらつきの原因はいろいろあろうが、ろ紙自身の物理的・化学的特性の不均一性が大きな原因と考えられる。ろ紙の痕跡は繊維の作る毛細管に水が浸透した範囲と考えられる。今、ろ紙の厚さを d 、ろ紙の空隙率(単位面積のろ紙が含む毛細管の全体積)を κ とすると、水滴の質量 m と痕跡面積 S との間には $m \propto \kappa \cdot d \cdot S$ の近似式が成り立つ

(丸山, 浜 1954)。したがって、ろ紙の厚みと空隙率のばらつきが直接痕跡面積のばらつきに影響する。ろ紙の物理的・化学的特性は各銘柄毎に JIS 規格で決められ、同一銘柄である限り、ろ紙本来の目的に対する性能は同じであることが保証されている。しかし、この保証は普通使われるろ紙の大きさ程度に対するもので、降水粒子スケールのような小さい範囲に対するものではない。実際問題として、ろ紙の製造工程で繊維構造や厚みを降水粒子程度のスケールで均一に制御するのは困難であろう。したがって、このような小スケールでろ紙の特性を見た場合かなり大きなばらつきがあるものと思われる。このばらつきは、ろ紙を使う限り避けることが出来ないもので、変換式 (1), (2) もこのばらつきを認めたくえ No. 1 のろ紙にたいして普遍的なものといえよう。

質量 1 mg を境に変換式が異なる直線になるのは、本来小水滴域で曲線である変換式を二つの直線で近似したことによるものである。

更に、もうひとつのばらつきの原因として、画像解析器による痕跡面積の読み取り誤差が考えられる。特に‘しきい値’の設定は難しく、設定如何によって痕跡の境界が変わったり、コントラストの弱い痕跡の部分が飛ばされ、一部が脱落し、馬蹄形になったり、二つに分裂したりして痕跡面積の過小評価が起こる。これを避けるためには、目測の場合より痕跡を濃くする必要がある。しかし、総ての痕跡濃度を同じにすることは不可能であって、画像解析器を使う限り、この種の誤差はある程度避けられない。この意味から、今回は著しい痕跡の変形を除いて、この種の誤差もあえて含めて解析している。このために分布の幅が小さい方に若干広がった可能性もあろう。

しかし、平均値は画像処理上の誤差を除いた場合に比

較して、殆ど差がなかった。

今回の誤差評価の基は、変換式とばらつきの頻度分布である。80個程度の標本から推定した頻度分布が、どの程度信頼性があるかは問題であろう。しかし、9種の頻度分布の幅に関する系統的な傾向があることをみても、得られた頻度分布は、真の分布をかなり良く表していると思われる。

謝 辞

検定にあたって、東京電力株式会社、開発研究所主任研究員、安井 充博士、同大容量送電研究室、内藤隆雄氏のご協力を厚く感謝致します。また、本検定にあたり全面的なご援助を戴いたスガウエザリング技術振興財団およびスガ試験機株式会社社長 須賀長市氏、同開発部長木村哲也氏に心から感謝致します。

注) この研究は東京電力株式会社との協同研究「雪片

含水率計の開発'の一環として行ったものである。

文 献

- Gunn, K.L.S. and J.S. Marshall, 1958 : The distribution with size of aggregate snowflakes. Jour. Met. 15, 452-461.
- Imai, I., M. Fujiwara, I. Ichimura and Y. Toyama, 1955 : Radar reflectivity of falling snow. Pap. Met. Geophys. 6, 130-139.
- 丸山晴久, 浜 一, 1954 : 雨滴や雪片の連続観測, 天気, 1, 50-52.
- 中村 勉, 1960 : 雪片含水率の測定法について, 雪氷, 22, No. 5, 145-146.
- Niederdorfer, E., 1932 : Messungen der Grosse der Regentropfen. Met. Z., 49, 1-14.
- 高橋喜彦, 1943 : 細雨の雨滴の大きさ測定に就いて. 気象集誌, 2, No. 21, 111-129.



スカイ・メッセージ

飛行機を用いて、青空を背景に、広告を行う「スカイ・メッセージ」という商売が、日本にも登場した。これは、5台の飛行機で、一定の間隔で煙を出し、その結果として、大空に文字を描くものである。大気の成層状態、風のシアアなどの予測など、応用気象の面から見ても、面白い分野とも思われる。今後、どの程度、日本で市民権を持つか興味を持たれるところである。

(住 明正)

