

3. エーロゾル・ゾンデの開発

三崎方郎*, 金沢五寿雄*, 池上三和子*

3.1 まえがき

基準観測所では地表面附近のエーロゾル濃度の測定が経常的に行われるが、これに加えて自由空間における垂直分布を知ることは、地球規模汚染の立場からみて、少なくとも2つの意義があると思われる。

その第1は、発生源から広域への拡散状況を知るためには垂直分布の測定がきめ手となると考えられる。発生源から大気中に放出されたエーロゾルは一般流ののって輸送されると同時に3次的に拡散される。エーロゾル粒子はその間、凝集沈降現象によって、それぞれの粒径に応じた寿命があるので、終局的に地球規模の汚染となるまでには、粒径にしたがった淘汰が行われ、またそれぞれの粒径に対する固有の垂直分布をもつに到るであろう。そして、この分布の形次第によっては、気象・気候に与える影響がまた変わってくると予想される。

第2については、基準観測所、または地域観測所において経常的に観測されている大気の混濁度との関係である。大気混濁度には地表から大気のトップまでのエーロゾルが関係する。しかし、基準観測所で測定が連続的に行われているのは地表におけるエーロゾル濃度のみであるので、それと大気混濁度とは本来は一対一の対応がのぞめない。

以上のような理由で、エーロゾル濃度の垂直分布の測定は時間空間的に適当な間隔で行われ、これによって基準観測所における経常観測を補強し、その資料をより効果的なものとするのが望ましい。

エーロゾルが気象・気候に与える影響にはその粒径によって大きな差がある。直径 $0.3 \mu\text{m}$ 以上の粒子 (Mie 粒子) は光の散乱を生じ、放射エネルギーの収支に重大な影響を与える。

一方、それより小さい粒子 (Aitken 粒子) が気象に与える影響については、まだ確定的な結論が得られていないが、人工的汚染粒子の主たるものであり、成層圏においても近年のエーロゾル研究の焦点である「気体の粒子化現象」の主たる対象である。Aitken 粒子は放射エネルギー収支には殆んど関与しないが、対流圏では雲物理を通して、成層圏では不均質化学反応を通して気象に影響を与える可能性がある。

先にも述べたように、エーロゾル粒子の寿命も、垂直分布も粒径に依存するから、その測定は粒径別に行われるのが望ましいが、粒径の細分化は実行上困難であるので、本研究では Aitken 粒子と Mie 粒子に大別してそれぞれの濃度の垂直分布を測定するためのゾンデ2種を開発することとした。

3.2 既存のエーロゾル・ゾンデ各種

対流圏、成層圏エーロゾルに関する現在までの知見の多くは航空機により求められたものであり、気球搭載のゾンデとして用いられたものは数少ない。そのうちでも最初に挙げられるべきエーロゾル・ゾンデ

* 高層物理研究部

は Junge 等が開発使用したものであろう (Junge C.E., C.W. Chagnon and J.E. Manson 1961, Junge C.E. 1961, Chagnon C.W. and C.E. Junge 1961)。Junge 等は小粒子 (半径 $0.1 \mu\text{m}$ 以下) と大粒子 (半径 $0.1 \mu\text{m}$ 以上) の2種のゾンデを用いている。彼等の小粒子ゾンデの本体は、エートケン粒子計数器で、検出器には写真装置を用いてゾンデ回収後に現像して読みとる。Mie 粒子用ゾンデには、“General Mills” 慣性ジェット・インパクトを用いており、これも回収を必要としている。

回収を必要とするゾンデ方式が日本では適当でないことは言うまでもないことである。テレメトリー方式でエーロゾル濃度を探査したのものには Newkirk 他 (1965) の用いた方法があるが、これはサンプリングによる直接測定ではなく、エーロゾルによる散乱の天空光を種々の高度で測定し、これから垂直分布を推定したものである。

サンプリングによる直接測定で、テレメトリー方式のエーロゾル・ゾンデを開発したのは、J. M. Rosen (1964) である。Rosen, Hofmann 等のワイオミング大学のグループは、このゾンデを改良発展させ、CIAAP (Climatic Impact Assessment Program; SSTによる成層圏汚染の研究 1972~1974) では、ワイオミングを中心とし、アラスカから南半球に至る各地でエーロゾル濃度の測定をした (Hofmann et al: 1975)。Rosen の方法は、いわゆるロイコ型エーロゾル・カウンターとして知られている方式 (個々の粒子による散乱光パルスを検出計数するもの) をゾンデ用に改装したものである。このゾンデでカウントされるのは、光を散乱させる粒子であるから、その直径は $0.3 \mu\text{m}$ 以上のもに限られる。この方式によるゾンデ観測は既に充分の成果を挙げているので、我々の今回開発をめぐした大粒子ゾンデはこの方式に従うこととした。

直径が $0.3 \mu\text{m}$ より小さい粒子、すなわち、Aitken 粒子は、Rosen ゾンデでは検出できない。ワイオミング大学のグループは、一種の霧箱で Aitken 粒子を霧粒化した後に、Rosen ゾンデで検出計数することとした。これを CN・カウンター (凝結核カウンター) と称した。ワイオミング方式の欠点は、ゾンデの重量が大きく、かつ極めて高価につくことである。

3.3 大粒子 (Mie 粒子) 用ゾンデ

Mie 散乱においては、サイズパラメーター ($2\pi \frac{r}{\lambda}$, r は粒子の半径, λ は入射光の波長) が5以下になると、散乱効果が急減するということがよく知られている。光源に白色光を用いた場合、Mie散乱を起す粒子の限界は実際上 $0.3 \mu\text{m}$ となる。いわゆるロイコ型エーロゾル・スペクトロメーターと称するエーロゾル粒子測定器は、試料空気をノズルから細い流束として噴出させ、それに光源からの光束スポットを当てる。試料空気の流束中に含まれるエーロゾル粒子がそのスポットを通過する際に、散乱光パルスが発生する。このパルスを波高分析器にかけて粒径を推定し、粒径別にパルスを計数するものである。

前節に述べたように Rosen とその協力者たちがワイオミング大学で開発したエーロゾル・ゾンデは、この種のエーロゾル粒子検出器をゾンデに仕立て上げたものである。今回の研究プロジェクトで、我々が

試作したものはこれにならったものであって、ゾンデ・センサーが粒子を検出した結果の送信方式も同様である。

Mie散乱強度は散乱角の小さい程大きい、その方向分布の微細構造は複雑であって、これを検出する受光器の位置は、測定精度、安定性を考慮すると、必ずしも散乱角の小さい方が良いとは言えない。受光器がうけた散乱光パルスの増巾回路の応答性能を併せた総合解析を金川(1974, 1976)が行っているが、これによると前方散乱 60° が実際上もっとも効率が良いとされている。

図3.1に試作した大粒子ゾンデの粒子検出部の基礎的構成を示す。流量 300 cc/min でノズルから噴出

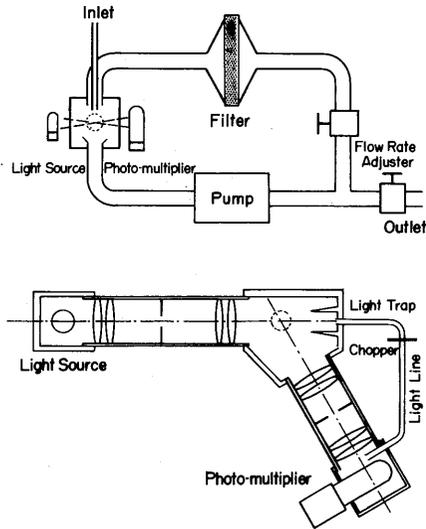


図3.1 大粒子ゾンデの粒子検出部の基礎的構成
上の図は試料空気の流路を示す。下の図は上の図の左端に画いてある光学系の拡大図である。

する試料空気の細い流束は、粒子検出部において光源からの入射光をうける。空気流の一部はフィルターを通してエアロゾルを除去した後導入部に環流され、試料空気の細流束を包む鞘となる。これによって試料空気がノズルから噴出した後、渦乱流となるのを防いでいる。光源にはハロゲン電球を用いてその光量

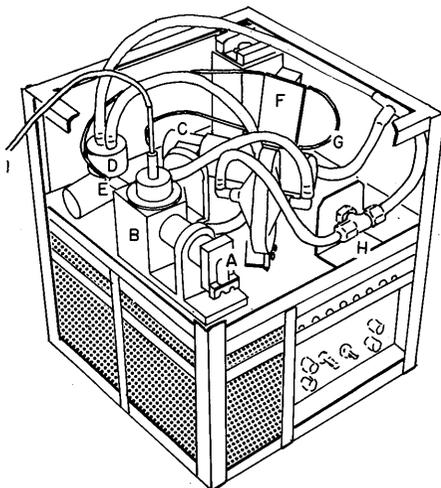


図3.2 大粒子ゾンデの外観
A:光源(ハロゲン電球), B:粒子検出部, C:光電子増倍管, D:ポンプ, E:ライト・トラップ, F:チョッパー, G:ライト・ライン, H:流量調節弁, I:試料空気取入口

の一定化をはかっている。試作1号機には、50 Wの電球を用いたので重量が過大であったが、2号機ではこれを10 W型に改めたために電源電池の削減が可能となり、重量が大巾に軽減された。

図3.2にゾンデの外観を示す。上段に検出部と光学系を配置し、下段に増巾器および電池を収容している。温度計、湿度計および送信アンテナは底面に取りつけられる。2号機の重量は、本体6.5 Kg、電源電池は試験用の2次電池で7.0 Kgであるが、実際の飛揚時には注水電池を用いれば数分の一に軽減できる。

図3.3はこのゾンデのブロック・ダイアグラムである。粒子検出光学系において発生した散乱光パルス

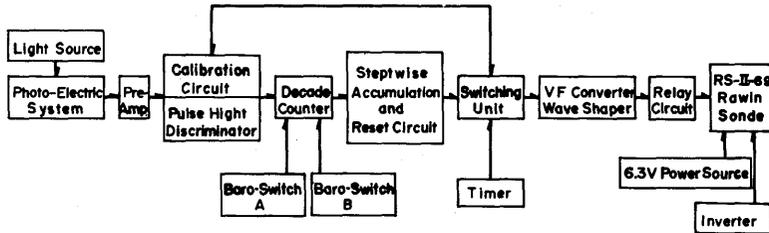


図3.3 大粒子ゾンデのブロック・ダイアグラム

は、光電子増倍管によって電気信号に変換されて電圧比較回路に入る。ここでノイズと分離され、直径0.3 μm以上の粒子による電圧パルスのみが計数されることになる。しかしながら、下層大気ではエアロゾルの濃度が高いため、そのままでは計数しきれないので、先ず減数回路に入れられる。

減数回路では、気圧スイッチの切換によって地上より500 mbの高度に至るまでは10:1に減数される。つまり検出粒子数10ケに対して1ケと計数する。高度500 mb以上では1:1、つまり減数をしない。これは計数精度を上げるために、エアロゾル濃度の垂直分布を想定して設けた方式である。

計数は積算され、50ステップ毎にリセットされる(図3.4参照)。したがって、減数比10:1の場合、リセットから次のリセットまでの間に検出した粒子数は500ケである。

図3.4に示した電圧波形はVF変換回路によって、0 Hz~200 Hzの可聴周波数に変換され、ICW変調入力となり、RS II 69型レーウィン・ゾンデの1680 MHzで送信される。

地上で受信されたゾンデからの信号は、検波・可聴周波FV変換され、直流10 mV記録計上で再び図3.

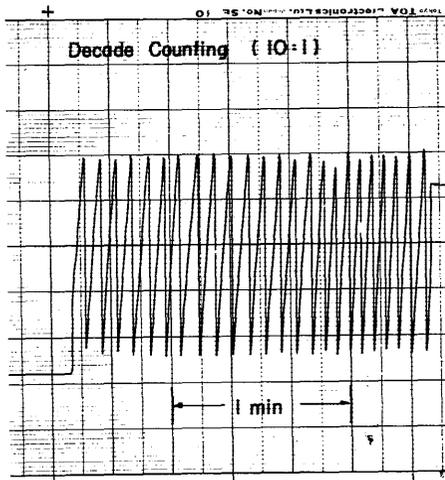


図3.4 大粒子ゾンデの記録例

流量は300 cc/minで、1分間に11.7回リセットされているから、 M_{ie} 粒子の濃度は

$$\frac{500 \times 11.7}{300} = 19.5 (\text{ケ/cc}) \text{と求まる。}$$

4の記録が再現される。

このゾンデは上記のエーロゾル濃度の他に時分割方式によって、気温、湿度も送信する。即ち、タイマーの働きによって気温測定6秒、湿度測定6秒、エーロゾル濃度5分、エーロゾル濃度キャリブレーション10秒のサイクルを繰り返す。気温、湿度用の素子はRS II69型レーウィン・ゾンデと同一のものをを用いた。

測定サイクルのなかに加えられたエーロゾル濃度キャリブレーションは、同測定器の光源からの光量、電気信号変換器、増巾器等の総合動作が正常に行われていることを保証するためのものである。光源に正対するライト・トラップ(図3.1参照)で受ける光の一部をライト・ライン(プラスチックの細線の束)でできており、可撓性で光を伝達する)により直接光電子倍增管に送る仕組みになっている。キャリブレーションに割り当てられた時間以外は、この光路はライト・チョッパーにより遮断されている。

表3.1に検出粒子数、階段波電圧と変調周波数の1例を示す。

表3.1 検出粒子数、階段波電圧、変調周波数の対応

1 : 1						10 : 1					
粒子数	階段波電圧	変調周波数	粒子数	階段波電圧	変調周波数	粒子数	階段波電圧	変調周波数	粒子数	階段波電圧	変調周波数
	V	Hz		V	Hz		V	Hz		V	Hz
1	0.04	4	26	1.04	104	10	1.96	196	260	0.96	96
2	0.08	8	27	1.08	108	20	1.92	192	270	0.92	92
3	0.12	12	28	1.12	112	30	1.88	188	280	0.88	88
4	0.16	16	29	1.16	116	40	1.84	184	290	0.84	84
5	0.20	20	30	1.20	120	50	1.80	180	300	0.80	80
6	0.24	24	31	1.24	124	60	1.76	176	310	0.76	76
7	0.28	28	32	1.28	128	70	1.72	172	320	0.72	72
8	0.32	32	33	1.32	132	80	1.68	168	330	0.68	68
9	0.36	36	34	1.36	136	90	1.64	164	340	0.64	64
10	0.40	40	35	1.40	140	100	1.60	160	350	0.60	60
11	0.44	44	36	1.44	144	110	1.56	156	360	0.56	56
12	0.48	48	37	1.48	148	120	1.52	152	370	0.52	52
13	0.52	52	38	1.52	152	130	1.48	148	380	0.48	48
14	0.56	56	39	1.56	156	140	1.44	144	390	0.44	44
15	0.60	60	40	1.60	160	150	1.40	140	400	0.40	40
16	0.64	64	41	1.64	164	160	1.36	136	410	0.36	36
17	0.68	68	42	1.68	168	170	1.32	132	420	0.32	32
18	0.72	72	43	1.72	172	180	1.28	128	430	0.28	28
19	0.76	76	44	1.76	176	190	1.24	124	440	0.24	24
20	0.80	80	45	1.80	180	200	1.20	120	450	0.20	20
21	0.84	84	46	1.84	184	210	1.16	116	460	0.16	16
22	0.88	88	47	1.88	188	220	1.12	112	470	0.12	12
23	0.92	92	48	1.92	192	230	1.08	108	480	0.08	8
24	0.96	96	49	1.96	196	240	1.04	104	490	0.04	4
25	1.00	100	50	2.00	200	250	1.00	100	500	0.00	0

3.4 小粒子 (Aitken 粒子) 用ゾンデ

小粒子 (Aitken 粒子) の垂直分布を測定するための気球塔載用の測器で適当なものは現在までには見当らない。対流圏・成層圏の Aitken 粒子濃度に関する知見は殆んど航空機による測定で得られたものである。地上からのリモート・センシングであるレーダーによる測定や、直達日射の波長別測定から推論されるエアロゾル濃度や粒径分布はいずれも Aitken 領域よりは大きい粒径領域にある。

前述したように、気球塔載用として現在までに開発されたもので、Junge のゾンデは回収を必要とするし、ワイオミング大学一派のものは高価にすぎる。Aitken 粒子濃度を測定する地上測器はいわゆるポラック・カウンターであるが、これには真空ポンプ等が不可欠であって、そのままでは到底気球塔載用の測器とはなり得ない。

今回の研究プロジェクトで、我々が開発をめざしたのは、極力低価格のゾンデであった。

ポラック・カウンターでは、容器内に試料空気を導入し、それが水蒸気で飽和するまでの一定時間待機した後、断熱膨脹を行って Aitken 粒子を核として霧粒子を生成させる。

この断熱膨脹に真空ポンプを必要とするわけであるが、気球の場合、上昇中容器を密閉して一定時間待期すれば、周囲の気圧は容器内より低圧となる。したがって、密閉容器を単に開放するだけで断熱膨脹が行われる。この方法をとれば、大電力を必要とする真空ポンプを搭載する必要がなくなる。我々のゾンデではこの原理を設計の眼目においた。

図 3.5 にこのゾンデの基礎的構成および動作を示す。霧箱の入口、出口には電磁バルブ V_1 、 V_2 が備え

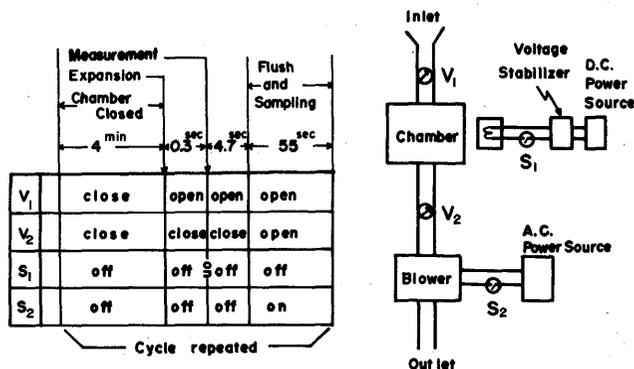


図 3.5 小粒子ゾンデの基礎的構成および動作

気球の上昇速度を $400\text{m}/\text{min}$ とすると、このプログラムで霧箱内の膨脹比は約 1.2 となる。

えられており、霧箱中の試料空気が加湿され、飽和に達するまでの待期時間 (4 分間) V_1 、 V_2 とともに閉じられている。待期時間終了時に V_1 が開き、霧箱中で断熱膨脹が起る。0.3 秒後にストロボが点火されエアロゾル粒子濃度の測定が行われる。約 5 秒後に V_2 も開かれ、ポンプが動作して霧箱内の空気と外気との入れかえが始まる。この洗い流しを 55 秒つけた後に V_1 、 V_2 が閉じて霧箱が密閉される。以上 5 分間のサイクルが以後繰り返される。

大気の気圧高度分布を 1962 年米国標準大気にとると、我々のゾンデの動作スキームは表 3.2 となる。ここに気球の上昇速度は $400\text{m}/\text{min}$ と仮定する。

表 3.2 の第 1 列は測定番号、第 2 列は放球後の経過時間、第 3 列はその時刻における気球の高度、第 4

表 3.2 測定番号, 時刻, 高度, 気圧, 膨脹比の対応

測定番号	時刻	高度	気圧	膨脹比
	min	m	mb	
	0	0	1013.	
1	4	1600	836.5	1.211
	5	2000	795.0	
2	9	3600	650.4	1.222
	10	4000	616.6	
3	14	5600	499.5	1.234
	15	6000	472.2	
4	19	7600	378.3	1.248
	20	8000	356.5	
5	24	9600	282.2	1.263
	25	10000	265.0	
6	29	11600	207.2	1.279
	30	12000	193.99	
7	34	13600	151.34	1.282
	35	14000	141.70	
8	39	15600	110.57	1.282
	40	16000	103.53	
9	44	17600	80.79	1.281
	45	18000	75.65	
10	49	19600	59.04	1.281
	50	20000	55.29	
11	54	21600	43.20	1.280
	55	22000	40.47	
12	59	23600	31.70	1.277
	60	24000	29.72	
13	64	25600	23.32	1.274
	65	26000	21.88	
14	69	27600	17.30	1.265
	70	28000	16.16	
15	74	29600	12.81	1.262
	75	30000	11.97	

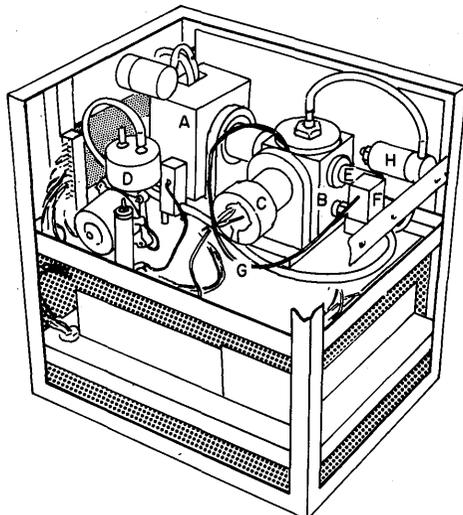


図 3.6 小粒子ゾンデの外観

A : ストロボ・フラッシュ, B : 霧箱, C : 光電管, D : 洗滌用ポンプ, E : ライト・トラッパー, F : チョッパー, G : ライト・ライオン, H : バルブ。

列は同じく気圧，第5列は膨脹比，即ち4分前の気球の位置における外気圧と，現位置における外気圧との比である。地上における標準的なポラック・カウンターの膨脹比は，約1.21であるから，ゾンデの膨脹比はこれと極めて近いことがわかつた。また表3.2にみられるように，地上から高度30 Kmに到るまでに2 Km毎の15点の測定値が得られる。

図3.6はこの装置の外観を示す。上段に測定用霧箱と光学系が配置され，下段に電子回路と電源電池が収容されている。送信アンテナはこの底面にとりつけられる。ゾンデ本体の重量は3.5 Kg，電源電池に乾電池を使用した場合4.8 Kgとなる。

図3.7はこのゾンデのブロック・ダイアグラムである。

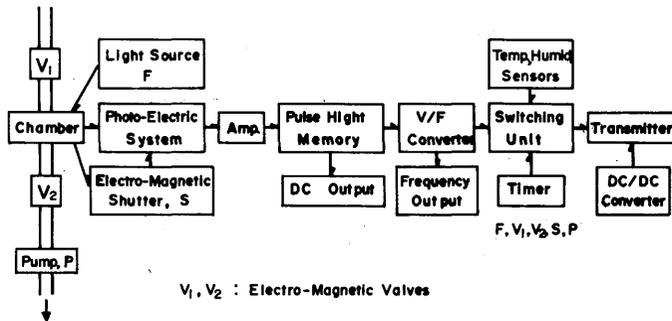


図3.7 小粒子ゾンデのブロック・ダイアグラム

今回試作した2基のゾンデのうち，第1次の試作器では，光源として通常の連続点灯方式をとったが，第2次の試作器では光源電力の節減を意図して点滅方式とした。ただし，このために生ずるかも知れぬ光源輝度の不安定を考慮して，一定の電気量を貯蔵する蓄電器を備えた定電気量放電型ストロボ・フラッシュを用いた。測定槽内の霧による散乱光は光電子増倍管で捕捉され，その強度の尖頭値が電子回路によって記憶され，10秒間保持される。この値は更にV/Fコンバーターにより0～200 Hzの可聴周波数に変換されて，RSII-69A型レーウィン・ゾンデの1680 MHzで送信される。

なお，電磁バルブV₁開放につづく5秒間を除く期間(待期4分+洗濯55秒)には，南極ゾンデに使用されている気圧計切換器による気温，湿度が送信されることになっている。

参 考 文 献

- Chagnon, C.W., and C.E. Junge, 1961: The vertical distribution of sub-micron particles in the stratosphere, J. Met., 18, 746-752.
- Hofmann, D.J., J.M. Rosen, T.J. Pepin, and R.G. Pinnick, 1975: Stratospheric aerosol measurements I; Time variations at northern midlatitudes, J. Atmos. Sci., 1446-1456.

Junge, C.E., C.W. Chagnon, and J.E. Manson, 1961: Stratospheric aerosols, J. Met., 18, 81-108.

Junge, C.E., 1961: Vertical profiles of condensation nuclei in the stratosphere, J. Met., 18, 501-509.

Newkirk, G. Jr., and J.L. Kroening, 1965: Aerosols in the stratosphere; A comparison of techniques of estimating their concentration, J. Atmosph. Sci., 22, 567-570.

Rosen, J.M., 1964: The vertical distribution of dust to 30 kilometers, J. Geophys. Res., 69, 4673-4676.

金川昭：1974，

エアロゾル濃度測定用光散乱フォトメータの応答計算，化学工学，38，513-519.

金川昭：1976，

エアロゾル粒子濃度測定用光散乱フォトメータの応答特性実験，化学工学論文集，2，38-41.