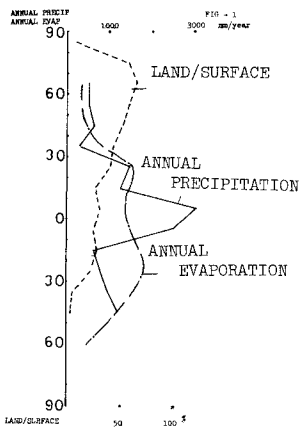


東京工業大学 正会員 竹内 邦良
東京工業大学 学生会員 ○矢戸 達行

1. はじめに

気象現象の一要素である降水は、基本的には地球上に存在する水の、太陽エネルギーによる、相変化を含む循環運動の一過程である。ここに地球規模でみて太陽エネルギーの移動が比較的に単純な方向性を持つものと見ることができ、降水現象も何らかの大きなスケールの変化に従った現象と考えられる。しかし、その循環の過程の物理性は十分に知られているわけではなく、さらに相変化という複雑な現象を含むことのため、変化の法則を見出すことは非常に困難であると考えられる。

ここでは、降水量記録をもとにして地球規模、また日本的規模の降水現象の空間的な相関を調べ、次にモスクワの地点降水量の時系列解析を行なうことを通じて現象を理解しようとした。さらに非定常性を考慮した解析の一例を示した。



2. 降水現象の空間的相関

図-1は降水量を巨視的にとらえた場合、降水現象がある規則性を持つようにみえる一例である。これによれば、水は地球を循環していて、それは海洋とかわりをもつと考えられる。

そこで、図-2に示す24地点の降水量(1921年-1960年)の空間的相関を求めた。(表-1)

表の上半分は年平均降水量からのずれの空間的相関であり、下半分は平均的な月別パターンからのずれの2乗値の空間的相関を表わしている。

ここに、相関係数は次のように計算されたもので、小数点以下の数値が記されている。

SPACIAL CORRELATION MATRIX

UPPER HALF ; RAW DATA
LOWER HALF ; DEVIATION FROM ANNUAL PATTERN

TABLE - 1

	ARC	MOS	IRC	PAR	VIC	SAP	CHI	TAS	DFN	TOK	SAN	NEW	TAI	HON	MAD	CAL	KAJ	LA	LIV	MAU	ALI	PER	BUJ	WFL
1 ARC		03	-02	-21	11	08	38	04	30	21	-21	06	-09	11	-32	10	-20	09	-01	-13	-04	-09	-22	-04
2 MOS	28		02	12	10	19	-18	10	-05	-23	-15	04	30	-17	-07	08	20	-15	02	13	-03	06	08	-04
3 IRC	10	-03		06	02	16	09	-29	11	21	12	-05	14	-05	-26	-08	08	16	-13	-11	03	-08	05	18
4 PAR	-12	-24	00		-43	16	-17	-30	05	-16	16	-03	25	16	12	21	05	02	09	11	-31	03	05	-17
5 VIC	23	31	-04	-04		07	02	25	-11	00	-25	-01	-04	18	-37	-15	22	-02	-01	-04	20	-01	05	-24
6 SAP	-07	12	22	03	03		14	-10	17	02	-05	02	16	07	-09	-12	05	06	13	22	09	26	02	-03
7 CHI	-21	-13	-07	06	-06	02		-02	40	21	09	-04	04	14	-35	40	-08	10	-22	03	-03	02	-22	-06
8 TAS	24	03	-13	-02	37	-23	-17		03	-02	-07	02	-09	-27	-13	-13	20	07	10	07	-02	15	-01	04
9 DFN	12	06	28	14	10	14	22	16		24	11	12	07	04	-33	15	-31	-13	-11	01	06	-10	-14	08
10 TOK	-02	-13	48	-14	-21	09	04	09	-04		17	-33	-17	21	-18	06	-23	02	32	11	03	-05	-15	25
11 SAN	-17	-13	03	27	-12	-03	15	-11	-08	24		-29	07	-07	24	16	16	06	12	11	11	-09	02	08
12 NEW	15	-03	-15	-01	-08	04	-32	-14	-27	-16	-12		13	-10	-06	-08	-21	21	-19	11	-12	11	23	-05
13 TAI	-22	-17	-05	07	-16	-01	06	-14	-26	02	10	02		-26	07	32	06	-11	03	09	02	-15	08	09
14 HON	-10	02	-15	-03	-11	02	12	19	01	03	15	-07	-03		-17	28	00	-04	18	-04	08	-04	-15	-17
15 MAD	-15	-08	00	-14	-12	-17	-09	-25	-11	-12	28	-17	12	-14		-15	-09	17	-04	17	-02	-14	24	05
16 CAL	03	11	13	07	12	19	06	-11	07	-01	17	-06	-14	36	-13		-01	-21	-18	24	-30	-14	-15	23
17 KAJ	00	00	06	-06	-20	-03	-16	-02	-16	-19	22	-12	02	-04	-20		05	11	01	-02	09	-27	-07	
18 LA	07	-01	-19	00	00	09	-09	-27	-31	-27	-09	-12	43	-25	22	-13		-06	-20	15	-08	21	11	-24
19 LIV	-18	-07	05	04	-11	02	-04	28	-02	35	07	-23	04	37	-06	-07	-03		-09	05	23	03	13	13
20 MAU	-21	-12	-18	26	08	10	-15	08	-25	14	-03	-03	16	06	-27	06	-11	36		23	-37	13	04	04
21 ALI	00	-24	-09	-02	-06	04	08	14	39	-17	10	03	04	-05	-03	-24	-09	-09	-08		-21	11	04	00
22 PER	-24	-03	-07	-17	-15	-16	-06	09	-13	15	-25	-08	15	30	-24	-17	14	-06	20	17		-02	-21	06
23 BUJ	05	06	-23	-04	-15	-17	-26	03	-18	-21	-24	24	-01	-03	-05	-14	21	19	-07	-03	-20		14	-10
24 WFL	-10	21	12	03	-24	04	-05	-20	03	10	05	00	-10	16	03	-04	-04	-13	-04	-14	-19	-03		12

$$r_{i,k} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ij} X_{kj}}{N}$$

$r_{i,k}$ i 地点 k 地点の相関係数

$$\text{UPPER HALF } X_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{\sigma_i}$$

x_{ij} i 地点 j 年降水量

$\bar{x}_i$ i 地点 N 年間平均降水量

σ_i i 地点 N 年間降水量標準偏差

$$\text{LOWER HALF } X_{ijm} = \frac{(x_{ijm} - \bar{x}_{im}) - (\bar{x}_{jm} - \bar{x}_m)}{\sigma_{im}}$$

x_{ijm} i 地点 j 年 m 月降水量

$\bar{x}_{im}$ i 地点 m 月 N 年間平均降水量

σ_{im} 上の 2 乗の標準偏差



1. ARGHUNSEL
2. FUKUOKA
3. UTSUNOMIYA
4. FUKUOKA
5. MATSUMOTO
6. SAPPORO
7. SAPPORO
8. SAPPORO
9. SAPPORO
10. SAPPORO
11. SAPPORO
12. SAPPORO
13. SAPPORO
14. SAPPORO
15. SAPPORO
16. SAPPORO
17. SAPPORO
18. SAPPORO
19. SAPPORO
20. SAPPORO
21. SAPPORO
22. SAPPORO
23. SAPPORO
24. SAPPORO

この結果は、選んだ 24 地点については月降水量は互いにほとんど無関係であることを示す。つまり、図-1 から推察される地球規模の気象現象はこの表からはとらえられない。

地球規模という大きな循環を地点降水量をもとにとらえることには無理があると考えられるから、メゾスケールの地域をとりあげ、日本の札幌、秋田、宮古、松本、東京、福岡、鹿児島 の 7 地点の降水量について同様の計算を行った。

表-2 は、これら 7 地点間の夏季-夏季、冬季-冬季降水量の相関で、表-3 は、夏季-冬季降水量の相関である。

この結果からわかることは、

- 1 札幌は他の 6 地点との相関が小さい
- 2 松本は札幌以外の地点と高い相関を持つ
- 3 東京、福岡、鹿児島 の 3 地点は総じて大きな相関を持つ。特に冬季は大きい。
- 4 半期遅れの相関はすべて小さい。

以上より、日本の月降水量の空間的特性を支配する要因について次のような推論を下すことができるであろう。

- 1 日本各地の降水に関しては、気団規模での現象が支配要因であり主として太平洋気団の影響を受ける地域とシベリア気団の

TABLE - 2
SPACIAL CORRELATION MATRIX

UPPER HALF ; SUMMER SEASON
LOWER HALF ; WINTER SEASON

SPP AKT MYK MMT TKY FKO KGS

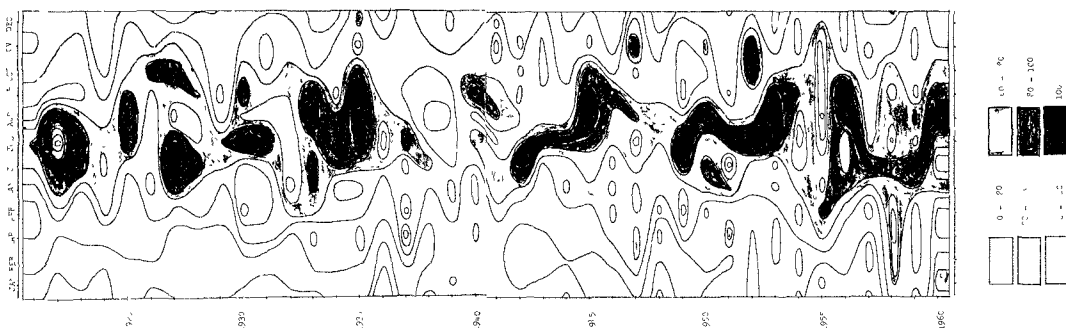
SAPPORO		29	06	36	03	11	-04
AKITA	35		37	-09	-33	11	-20
MIYAKO	10	48		34	33	32	22
MATSUMOTO	11	34	51		48	54	47
TOKYO	06	13	50	81		17	25
FUKUOKA	02	09	12	62	44		59
KAGOSHIMA	13	15	08	50	46	71	

TABLE - 3
SPACIAL CORRELATION MATRIX

SUMMER SEASON - WINTER SEASON

	SPP	AKT	MYK	MMT	TKY	FKO	KGS
SUMMER							
WINTER							
SAPPORO	-15	-20	-05	-11	07	27	23
AKITA	-8	16	05	-29	-13	-14	-09
MIYAKO	-22	-08	00	-08	-01	-09	23
MATSUMOTO	-08	17	20	-07	-07	-20	25
TOKYO	-06	-06	22	12	02	-11	29
FUKUOKA	04	10	29	13	17	03	20
KAGOSHIMA	-10	22	38	08	22	-04	16

Fig-3
MOCCOW MONTHLY PRECIPITATION



影響をうける地域との2つに区分できる。

- 2 夏季と冬季の降水量の間には全く関係が無く、夏季の雨と冬季の雨(雪)を支配する2つの気圧の間には相関が認められない。

3. 地点降水量の解析——モスクワ——

前節でみたように、降水現象は基本的には地球規模の運動の一過程であるとしても、かなり地域性が強いものである。また、その性格は地点降水量をもとにしてはこれ以上把握することはむずかしい。そこで、一地点の降水量に注目した時系列解析を試みた。地点としては比較的安定した気候状況をもつと見られるモスクワを選んだ。

まずモスクワの降水現象の概要をパターン認識するため、図-3を描いた。これによると、

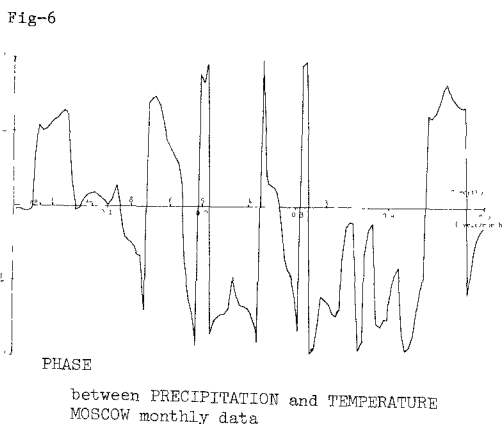
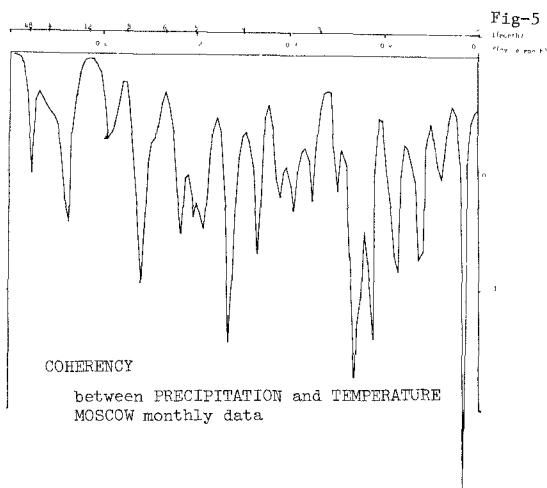
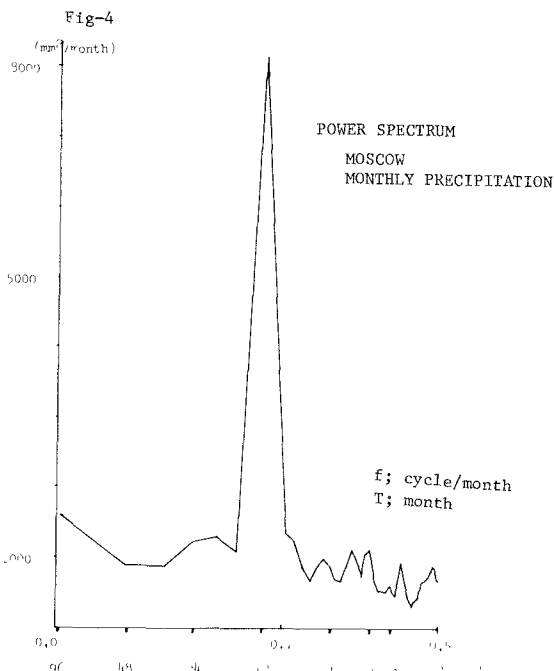
- 1 降水は1年の周期を持ち、6月から9月にかけてが豊水期である。
- 2 1939年に渇水があり、その前後で年変化のパターンが変わっている。それ以前には、1年おき程度で豊水年がくりかえしているのに、以後は2年以上の周期に変わっている。

周期性をより明確にとらえるためにスペクトル解析を行なった。離散量のスペクトルの計算法として開発されたTUKEYの方法を、ここでは用いた。(図-4)結果によると、降水現象は12か月の強い周期性を呈し他の周期成分はほとんどもないものと判断される。

次に気温と降水の相互の関係をみるために、降水量と気温との相互相関をとり、コヒーレンシスペクトルとフェイズスペクトルを求めた結果が図-5、図-6である。

これらの図では、降雨・流出のようなインプット・アウトプットの系にみられる、現象を明確に説明し得る結論は得られないが、傾向として次のことがいえる。短周期成分は、線形性が悪く、気温の変化が降水の変化より1/4周期程度進んでおり、長周期成分は、ある程度の線形性を持ち、降水の変化が気温の変化よりも1/4~1/2周期進んでいる。また、12か月周期の成分は、かなりの線形性があり、位相のずれはほとんどない。

以上のことは、次のことを暗示している。



- 1 年単位のような長周期の降水変動は、気温の変動とほぼ、正相関を持ち、気温の低下と降水量の減が同時に起こる。
- 2 季節単位のような短周期の降水変動は、気温の変動と逆相関を持ち、気温が低下する時、降水量は増大する。

ここに、コヒーレンシスペクトル $\gamma_{xy}^2(f)$ 、フェイズスペクトル $\theta_{xy}(f)$ は次式で表わされる。

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f) P_{yy}(f)}$$

P_{xy} 降水量と気温とのクロススペクトル

P_{xx} 降水量のパワースペクトル

P_{yy} 気温のパワースペクトル

Q_{xy} P_{xy} の虚数部

C_{xy} P_{xy} の実数部

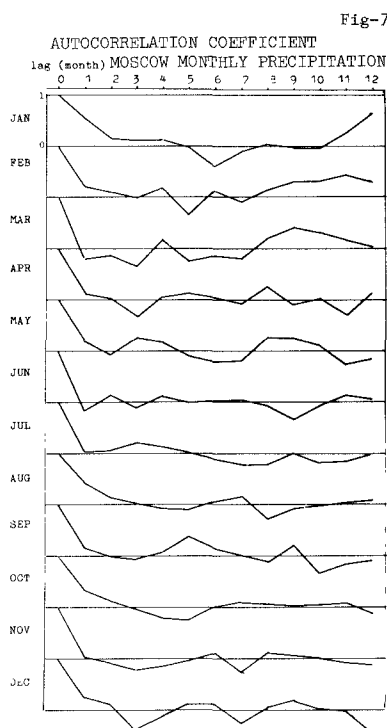
$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \left(\frac{Q_{xy}(f)}{C_{xy}(f)} \right)$$

4 非定常解析の必要性

これまでの解析はすべて、定常過程としての取り扱いであった。しかし、図-3からも推察されるように降水現象は明らかに非定常性を有するものであり、定常的な取り扱いでは気象変動、最近問題となっている地球規模での異常気象などの現象を把握することはできないであろう。図-7は降水現象の非定常性をあらわすもので、各月毎に求めた降水量の自己相関が違った形を持つことを示している。

ここでは、非定常過程の取り扱いのうち、非定常のスペクトル解析の1つ、Page の Instantaneous Power Spectrum について述べる。

スペクトルはある時系列のフーリエ変換で表わされるが、フーリエ変換はその時系列の $-\infty$ から $+\infty$ までの値により計算されるものである。ところが、時系列のスペクトルを求める時用いる値はその時刻までのものであり将来の値の影響はうけない。つまり、スペクトルが時間の経過につれて変化すると考える。そのため、パワースペクトルを求める時には、時間と周波数の領域に分布したエネルギーを考へる必要があり、このエネルギー密度 $P(t, f)$ を Instantaneous Power Spectrum という。数学的には、その時刻までの時系列を用いてフーリエ変換した結果より得られるエネルギー・スペクトルの時間微分で表わされる。



5 おわりに

地球規模、日本的規模での降水現象、モスクワの地点降水量について定常的解析を行なったが、現象を把握するに十分な結果は得られなかった。降水現象は明らかに非定常性をもつものであるから、非定常過程としての解析が必要であり、それを通じて現象の理解が深まるであろう。

参考資料・参考文献

- 1 WORLD WEATHER RECORD, U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE ESSA
- 2 石原藤次郎, 本間 仁 ; 応用水理学下II, 1971
- 3 小倉義光 ; 大気科学, 1968
- 4 CHESTER H. PAGE ; Instantaneous Power Spectrum, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS Vol.23 No.1