

(120) スウェーデン・ルンド市における238年間の 気温および降水時系列の長期的変動解析

Analyses of a 238-Year Long Precipitation and Temperature Time Series at Lund in Sweden

河村 明*・神野健二**・Ronny Berndtsson***

By Akira KAWAMURA, Kenji JINNO and Ronny BERNDTSSON

1. はじめに

現在、フロンガスなどによる成層圏オゾン層の破壊、二酸化炭素などの温室効果ガスによる地球温暖化、酸性雨による森林や湖沼の被害、焼き畑移動耕作などによる熱帯林の破壊や、家畜の過放牧などによる砂漠化の進行、化学物質による海洋汚染、野生生物の種の減少など様々な地球環境問題とその影響が人間の生存に関わる重要な課題となってきた¹⁾。これに伴い気候変動の現状把握とその影響評価そして気候変動の定量的予測が焦眉の問題となってきた²⁾。特に水資源問題については、前提としていた気候条件が変化するので、解析、計画管理などの変更を余儀なくされるであろう。

地球温暖化の全地球的な規模の影響評価については、GCM(大気循環)のようなグローバルな気候モデルなどにより、温室効果ガス濃度が増加した場合のシミュレーション結果から気温の上昇量や降水量の地域分布の変化の予測がなされている。例えば、気温に関しては、北半球の冬、特に高緯度地方でその上昇が著しく、また、降水量に関しては、世界平均でみて増加し、温暖化が進行する程降水量は多くなり、また年を通じて高緯度地方が多くなることなどが予測されている^{3)・4)}。しかし、現在のところ不確定な要素が多く、各種のモデル間の整合性が十分でなく、特に、水文・水資源で対象とする個々の狭い地域での気候変動の影響の評価を行うのは困難な状況にある^{3)・5)}。従って、個々の流域においては、実際のデータを用いて、GCMモデルによる予測の検証およびその地域での気候変動の定量的予測と影響評価を行う必要がある。この場合、大気・気象の長期変動を議論し得る程長期間にわたる気温および降水などのデータが必要不可欠となる。

さて、スウェーデンのルンド市ではわが国では得難い良く管理された長期(1753年から)の気温および降水のデータが蓄積されている。そこで、本報では、スウェーデン・ルンド市における1753年から1990年までの238年間の月平均気温データおよび月降水量データを用いてこれらの長期的変動解析を行っている。すなわち、まず気温・降水の年時系列より線形トレンドや移動平均法により、これらの長期的変動傾向を把握した後、月別の変動傾向について解析を行っている。次に、気温・降水の相関関数およびスペクトルを求め、これらの時系列の周期的特性などについて考察を行っている。

2. 解析に用いたデータ

本解析に用いたデータは、スウェーデン・ルンド市における1753年から1990年までの238年間の月単位の気

* 九州大学助手 工学部水工土木学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

** 九州大学教授 工学部水工土木学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

*** ルンド大学助教授 工学部水資源工学科 (Box 118, S-22100 Lund, Sweden)

温と降水量のデータである。これらのデータの内、1860年までは参考文献6)のレポートをデータ源としており、1861年以降はスウェーデン気象水文研究所のレポートをデータ源としている。気温の観測については、1867年、1940年、1971年の3回程観測地点を変更している。また、降水量観測については、1769年、1867年、1942年、1974年の4回観測地点を変更している。いずれの場合も、観測地点の水平方向の変更距離は最大2 km程度で、垂直方向には最大数m程度である。1950年頃の気温に対して6年間そして降水に対して15年間の2地点同時観測によると、2地点間の観測量の値の差は、平均してそれぞれ23mm/year, 0.16° C/year程度と報告されている。

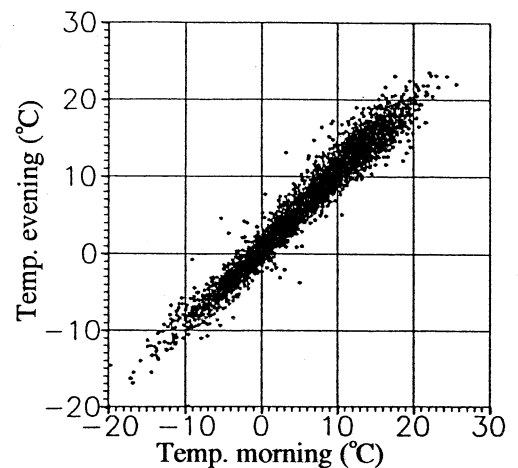


図-1 午前と午後の半月平均気温の相関図

次に、参考文献6)の気温データは、午前8時頃と午後5時頃の2回の値を、半月毎の平均値として記している。よって、これらのデータの平均として当該半月の平均気温とし、さらにこれを月単位毎に算術平均して月平均気温を算出した。この場合、これらの気温のデータには（特に午前の気温に対して）欠測があったので以下のようにしてデータの補間を行った。すなわち、午前もしくは午後のデータが欠測している場合は、午前と午後の気温の相関図が図-1のように高い相関（相関係数は0.979）を示すことより、午前の気温を T_m 、午後の気温を T_a とし、 $T_m = 0.974 T_a - 0.446$ で回帰し補間した。なお、午前・午後ともにデータが欠測している場合はなかった。しかし、1821年から1833年の13年間の気温のデータが完全に欠測しているため、本報ではとりあえず、この間のデータとしては各月毎に全データの平均値を与えて時系列を補間した。なお、1861年以降の気温データはレポートに月平均として記述されているものをそのまま用いた。また、降水量データについては各レポートに月降水量データとして記録されているものをそのまま用いることとする。

3. 年時系列の長期的変動傾向

図-2および図-3にそれぞれ、238年間の年平均気温および年降水量の時系列を示している。図中には30年移動平均時系列および破線で線形トレンドを併記している。また、参考として1750年以降の大気中の二酸化炭素濃度の変化を参考文献7)より引用して図-4に示している。図-2より、年平均気温は顕著な増加傾向にあることが分かる。238年間の年平均気温の最小二乗法により求めたトレンドの直線式は、年平均気温 $y = 0.0110x - 13.8072$ (x :西暦年)であり、これより100年で約1.1度

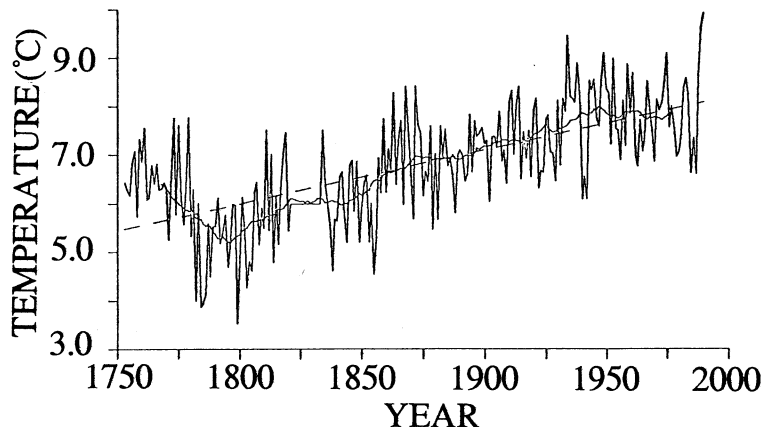


図-2 年平均気温時系列およびその30年移動平均とトレンド

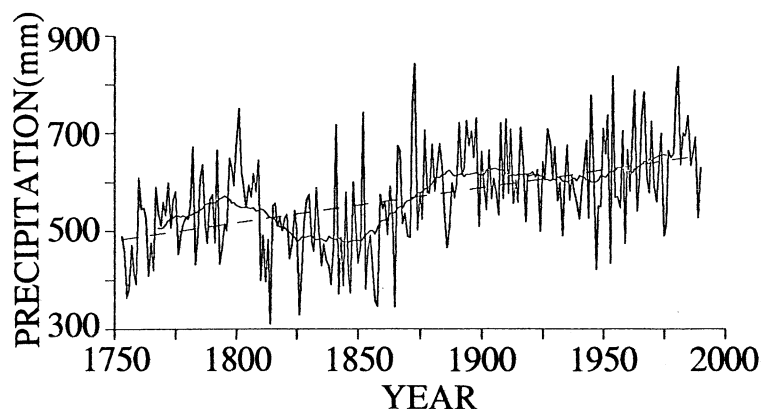


図-3 年降水量時系列およびその30年移動平均とトレンド

の上昇が認められる。また、30年移動平均より、1750年から1800年頃までは気温は下降しており、1799年には年平均気温は3.53度である。その後、小さな変動はあるものの一貫して上昇傾向にある。特に、1990年の平均気温は9.93度で1799年のそれとの差は実に6.4度である。よって、1800年以降の年平均気温データに対する上昇割合は、上述の1.1度/100年よりさらに大きくなる。次に、図-3より降水量の変動をみると、これも明かな増加傾向を示しており、トレンドの直線式は、年降水量 $z=0.717x-773.87$ (x :西暦年)となり、100年間で70mm程度の増加が認められる。また、30年移動平均曲線を見ると長期的な変動がみられる。すなわち、1795年~1825年頃は減少傾向、1850年~1890年頃は増加傾向、その後1940年頃までは緩やかな減少、そして1950年頃から再び増加傾向となっている。ここで興味深いことは、一般に気温が上昇すれば降水量が増加することが言われている^{3)、8)}が、気温が上昇し始めた1800年頃から降水量は逆に減少し始め、およそ30年程度の時間遅れを伴って、増加傾向に転じていることである。これより、気温変化の影響が、降水量に長期的に及ぶと考えた場合、このようにかなりの時間遅れを伴うことが示唆されよう。

さて、気温・降水量の増加傾向の原因については、はっきりしたことは言えないが、図-4に示すように産業革命以降の急激な二酸化炭素濃度の増加による温室効果の影響も一因と考えられる。また、ルンド市の人口はほぼコンスタントに増加しているため都市化の影響⁹⁾もその一因と考えられよう。

4. 月単位の変動傾向

図-5、図-6にそれぞれ、各月毎の平均気温と平均降水量およびそれらの標準偏差を示している。また、図-7、図-8にはそれぞれ、気温・降水量の月単位での全データのヒストグラムを示している。図-5より、気温は7月に最も高く16.2°C程度であり、2月が最も低く-1.3°C程度となっている。標準偏差は冬期の方が夏期に比べて大きくなっている。ルンド市の緯度はおよそ北緯55度40分であり、カムチャッカ半島の中央部くらいの緯度であるが、暖流の北大西洋海流の影響で、緯度が高い割には温暖な気候となっている。

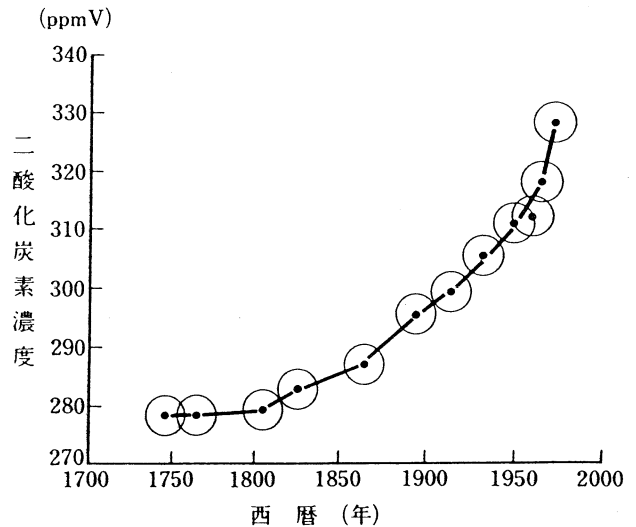


図-4 南極氷床コアの空气中的二酸化炭素濃度の経年変化 (Neftel et al., 1985)

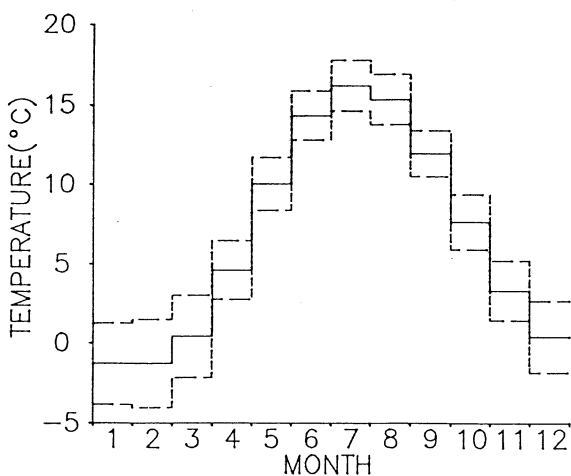


図-5 各月毎の平均気温とその標準偏差

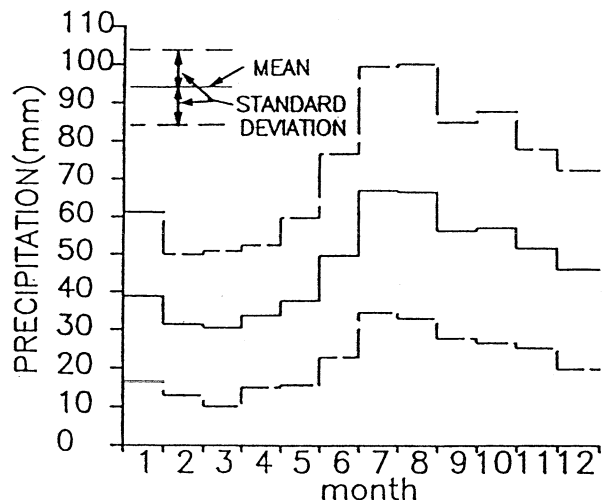


図-6 各月毎の平均降水量とその標準偏差

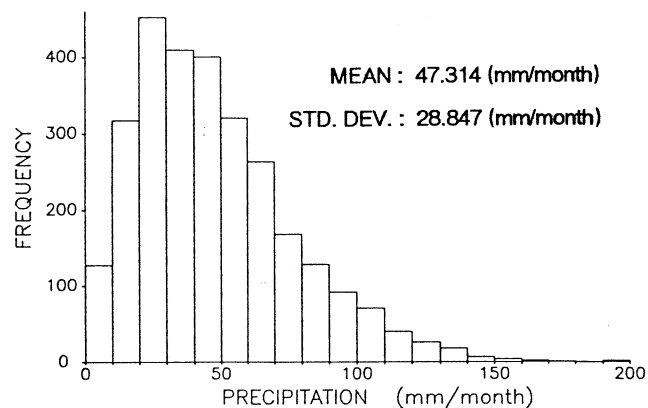
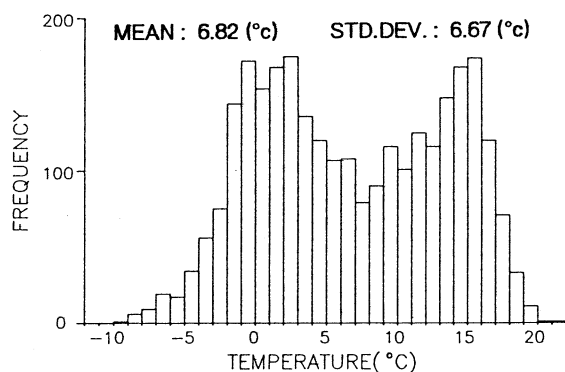


図-7 月平均気温データのヒストグラム

図-8 月降水量データのヒストグラム

次に、図-6よりルンド市の平均的な降水パターンは、7、8月に1つの山があり3月に1つの谷がある比較的単純な降水パターンとなっている。また、山と谷の差は2倍程度であり日本のそれと比べるとかなり小さい。標準偏差は上述の多雨月にやや大きく、少雨月にやや小さくなっているもののその差は余り顕著ではない。次に、図-7より、月平均気温のヒストグラムは二つのピークを持つ形状をしているが、これは夏期と冬期で母集団が異なり、出現頻度が変化するためと考えられる。また図-8より、月降水量は対数変換やn乗根変換によって正規化できる形状となっている。

5. 相関関数およびスペクトルによる解析

図-9、図-10にそれぞれ、気温・降水量の年単位および月単位の自己相関関数を示している。図-9より、気温・降水量ともラグタイムが大きくなるに連れて徐々に相関が小さくなっている。これは図-2、図-3のトレンドが影響しているからである。また、年平均気温の方が年降水量に比べ、相関関数値が0.2程度高くなっているが、これは1821年~1833年の年次系列の欠測データを全年の平均値として一定値で補間しているためである。なお、1984年以降の年次系列について自己相関を計算すると、大体年降水量と同様の自己相関関数値が得られた。また、図-10の月単位の自己相関をみると、気温・降水量ともに顕著な12ヶ月周期がみられる。特に、気温の周期性は降水量のそれに比べかなり大きくなっている。

次に、図-11、図-12にそれぞれ、年および月単位の、気温を基準とした降水量との相互相関関数を示している。すなわち、ラグタイムが正の場合は、そのラグタイムだけ後に出現した降水との相互相関を計算したことを意味している。図-11のように相互相関が全般的にかなり大き目の値となるのは、気温・降水量ともに増加傾向にあるためである。また図-11では、ラグタイムが正の値の場合の方が、負の場合よ

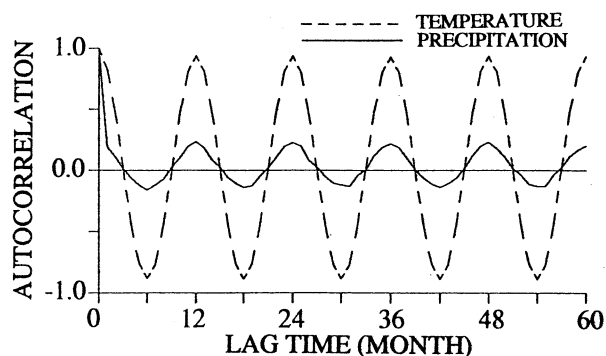
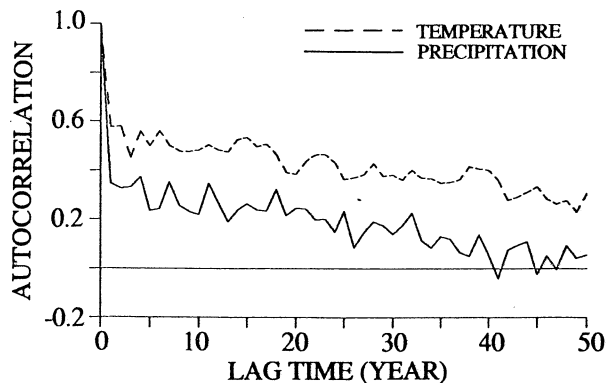


図-9 年平均気温および年降水量の自己相関関数

図-10 月平均気温および月降水量の自己相関関数

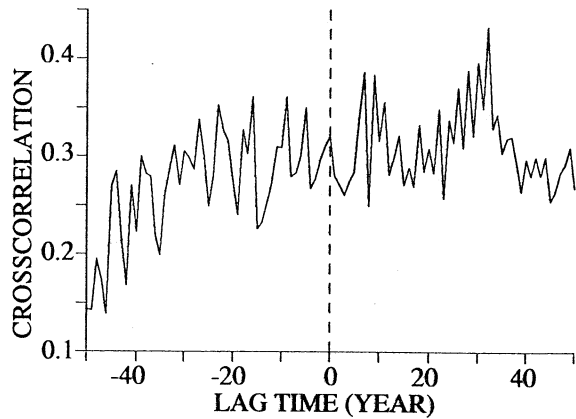


図-1-1 年平均気温と年降水量の相互相関関数

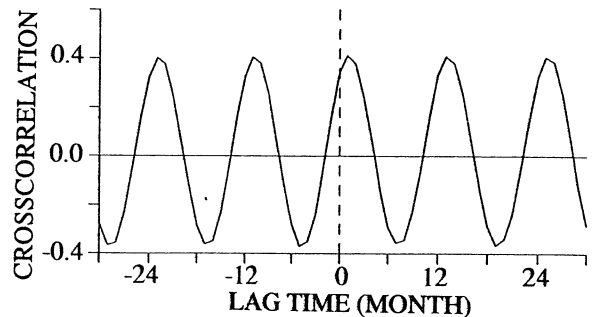


図-1-2 月平均気温と月降水量の相互相関関数

りも相互相関が大きくなっている。特に、ラグタイムが7~9年および30~32年のところで相関が高くなっている。このことは、気温の影響がこの程度の遅れ時間を伴って、降水に影響を与えていることを示唆しているとも解釈される。次に、図-1-2より月単位で相関を見た場合、ラグタイムが0±12ヶ月ではなく1±12ヶ月のところで相関が最も高くなっている。これは気温の月単位での短期的な影響は、1ヶ月遅れで降水量に強く作用することを示しているといえよう。

次に、図-1-3、図-1-4に、それぞれ年単位の気温および降水量の最大エントロピー法によるスペクトル解析の結果を示している。また、図-1-5、図-1-6には同じ方法による月単位でのスペクトル解析の結果を示している。図-1-3より、年平均気温の周期成分は、周波数が0近くすなわちトレンドに相当するところの超長期的な周期成分が卓越している。それ以外の周期成分は余り顕著ではないものの、17年、13年、7.5年、5.6年、4.6年の周期成分がみられる。図-1-4の年降水量については、トレンド以外に16年、10年、4年、3.5年、2.3年の周期成分が卓越している。これらの物理的説明はかなり難しいが、10年周期は太陽黒点数の周期に対応するとも考えられる。次に、図-1-5、図-1-6の月単位の結果より、気温、降水量とも1年周期がずばぬけて卓越していることが分かる。気温については1年周期以外に6ヶ月周期が顕著であり、降水量については、6ヶ月、4ヶ月周期が卓越している。なお、降水量については、1年以上の周期成分で、図-1-4にも見られた3.5年、2.3年の他に1.4年、1.1年の周期成分も検出されているようである。

6. むすび

本報では、スウェーデン・ルンド市における238年間の気温および降水量のデータを用いてこれらの長期的変動解析を行った。その結果、気温・降水量とも顕著な上昇もしくは増加傾向がみられた。また、気温の上昇の影響は、月単位では1ヶ月遅れで、また年単位では30年程度の遅れで作用することが示唆された。周期特性については、特に降水量時系列に

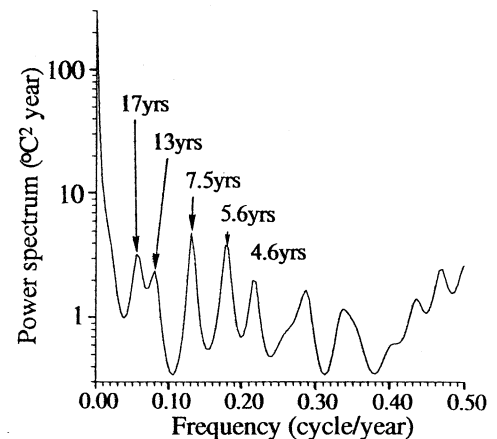


図-1-3 年平均気温のスペクトル

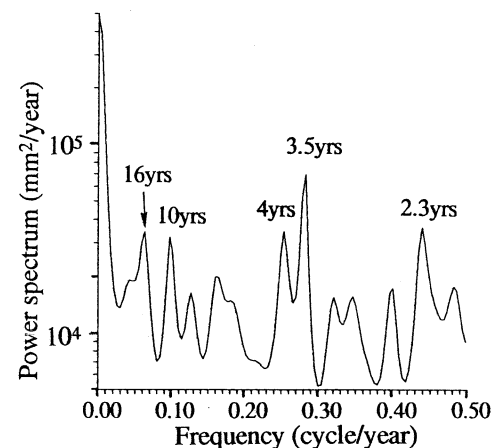


図-1-4 年降水量のスペクトル

において卓越した長期的な周期成分が検出された。

さて、10年以上の多年にわたる平均値が突然に変化することは気候ジャンプと呼ばれているが、この気候ジャンプは最近の観測時系列にも認められている¹⁰⁾。この一因としては、気候が高度の非線形性を有しているためと考えられている¹⁰⁾。本報では、気候ジャンプの検出などの解析は行っていないが、今後さらに、本報の基礎的結果を踏まえ、参考文献11)、12)の適応的カルマンフィルターなどの手法を用いて、気温・降水量の変化時点とその変化量の検出・同定を行ってゆくつもりである。

なお本研究は、平成3年度文部省科学研究費、総合研究(A) (課題番号: 03302046、研究代表者 小尻利治)の補助を受けました。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 伊藤和明: 地球環境の危機、水文・水資源学会誌、Vol. 3, No. 3, pp. 3-6, 1990.
- 2) 河村武・米谷恒春: 気候変動による環境・社会影響に関する国際会議(CIES)の報告、水文・水資源学会誌、Vol. 4, No. 3, pp. 63-66, 1991.
- 3) 西岡秀三: 地球温暖化に対処する研究の方向、水文・水資源学会誌、Vol. 4, No. 1, pp. 3-10, 1991.
- 4) 朝倉正: 異常気象と降水、水文・水資源学会誌、Vol. 2, No. 1, pp. 5-14, 1989.
- 5) 吉野文雄: 地球温暖化による水文環境への影響予測、土木学会誌別冊増刊 (地球環境とシビルエンジニア) Vol. 75, No. 5, pp. 18-21, 1990.
- 6) Tidblom, A.V.: Einige Resultate aus den Meteorologischen Beobachtungen, angestellt auf der Sternwarte zu Lund in den Jahren 1741-1870, Lunds Universitets Arsskrift, Tom, XII, Afd. Mathem. Naturvetenskap, 1-78, Lund, 1876.
- 7) 北野康: 二酸化炭素の温室効果とその大気圏濃度の増加トレンド、土木学会誌別冊増刊 (地球環境とシビルエンジニア)、Vol. 75, No. 5, pp. 7-10, 1990.
- 8) 盛谷明弘・丹羽薫: 長期観測資料に基づいた温暖化の水資源への影響評価について、水工学論文集、第35巻、pp. 647-652, 1991年2月.
- 9) 小葉竹重機・川島仁・久田民主: 北関東地域における降水量・気温の長期変動傾向について、水工学論文集、第35巻、pp. 653-658, 1991年2月.
- 10) 山本龍三朗: 地球環境変化に関する概説 - その一般的問題点、土木学会誌別冊増刊 (地球環境とシビルエンジニア)、Vol. 75, No. 5, pp. 1-6, 1990.
- 11) 上田年比古・河村明・神野健二: 適応的カルマンフィルターによる異常値検出について、土木学会論文集、第345号/II-1, pp. 111-121, 1984年5月.
- 12) 河村明・上田年比古・神野健二: 降水時系列の長期的パターン変動の解析、土木学会論文集、第363号/II-4, pp. 155-164, 1985年11月.

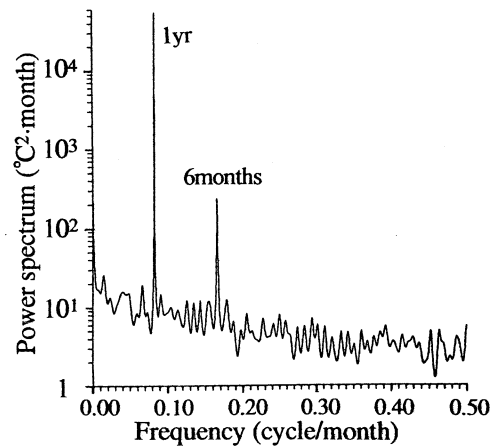


図 - 1 5 月平均気温のスペクトル

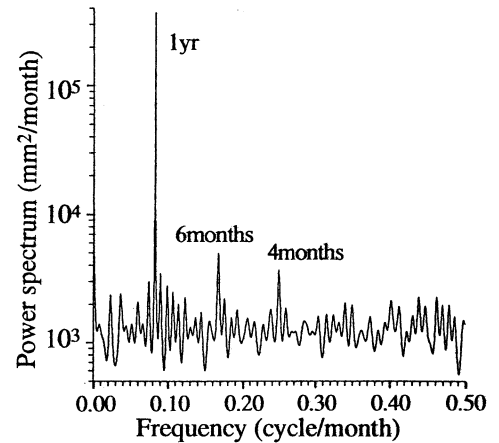


図 - 1 6 月降水量のスペクトル