

# 地球温暖化と極端な気象現象\*1

山元 龍三郎\*2

先ほどは不破先生<sup>(\*)</sup>から環境問題に関する非常に広範かつ含蓄あるお話を伺いましたが、私は、ある研究グループがこの2、3年の間苦勞して、この問題に取り組んでいる状況をお話をして、地球環境問題というものの難しさをご理解いただければと思います。『地球はどうなる?』との問いには恐らく答えることが出来ないでしょうが、その答えの足がかりになるかもしれないと思っています。

集中豪雨とか台風という災害をもたらす極端な天気現象を取り上げますと、『天気現象の激しさの上限が最近、地球温暖化と共にひどくなりそうだ』という話しができそうです。このことをある研究グループが結論として導き出しました。今日はこのような結論が導かれたプロセスをお話したいと思います。『地球温暖化と共に災害をもたらす気象現象が激しくなる』とってしまうと、週刊誌の見だしにもなりかねませんので、お話のポイントはなんといいまし

ても、この研究結果が導かれるまでのプロセスです。

地球温暖化の一つの側面としてよく知られているのは、大気中の炭酸ガスの増加によって、地球全体の温度が高くなり、徐々に海水面が上昇することです。しかしここで特に注目するのは『地球温暖化と共に気象災害を引き起こすような台風或いは集中豪雨といったものの激しさが変わるのか、変わらないのか』という問題でございます。地球温暖化という現象は文字通り地球規模ですが、地球一周4万kmに対して、集中豪雨を引き起こすような現象は精々100km、台風でも数百kmです。両者の空間スケールは地球に比べて桁違いに小さいのです。時間スケールでも、災害を起こすような気象現象はずっと小さいわけです。『空間と時間のスケールが全然違った現象の間に何か関係があるのか、ないのか』という議論は一筋縄ではいかない。当然悪戦苦闘が伴います。

表1. 主要な嵐 (windstorm catastrophes) (1960~1992) による10年間の被害額 (米ドルの1992年貨幣価値に換算) の変遷。Munich Re (1993) の資料に基づくJ.P.Bruce (1994) より引用

	1960~1969	1970~1979	1980~1989	1983~1992
被害総額 (億ドル)	226	336	380	881
支払い保険金 (億ドル)	53	83	189	521

\*1 創立50周年記念講演会 (平成8年11月8日) 講演 \*2 京都大学名誉教授

\*3 「地球環境の将来 (不破 敬一郎)」

## 〈気象災害の増加〉

図1は、横軸に1967～91年の25年間をとっており、縦軸は自然災害による年間の被害者総数（世界中）です。世界気象機関の事務総長のオバシさんがまとめた図をお借りしたのですが、60年代後半の被害者は多くて5千万人、これが大きく変動しながら、90年代には3億～3億5千万の年もあります。平滑化しますと明らかな増加傾向がございます。これには地震や火山による災害も含まれており、天気現象やそれに関連した現象も含めて、自然現象全体による被害はこういう状況です。天災による被害を数字に表わしているのが損害保険でございまして、その増加傾向を示すのが表1（前頁）です。1960年代、70年代、80年代の10年間に比べて、80年から90年の10年間は、支払い金額が特に増えており、損害保険業界では大問題としています。たとえば図2はアメリカに限定していますが、横軸は1925～90年、縦軸は洪水による年間の被害総額の対数です。年による大きな変動はありますが、1920年代を平均しますと、だいたい1億ドル、90年代に入りますと30億ドル近くになっています。

『気象災害が非常に増えている』という事実は否めない。『このような被害の増加は、人口増加や社会の脆弱性など、社会構造が主な原因であって、天気現象の結果ではないのではないか』という意見もございます。実際気象庁の気候問題懇談会でこの話をしました時に、立教大学の経済の先生が『損害保険上の支払いの急増というのは保険

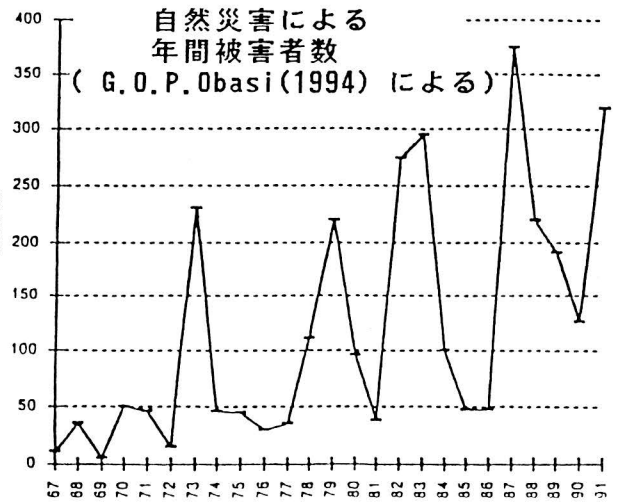


図1

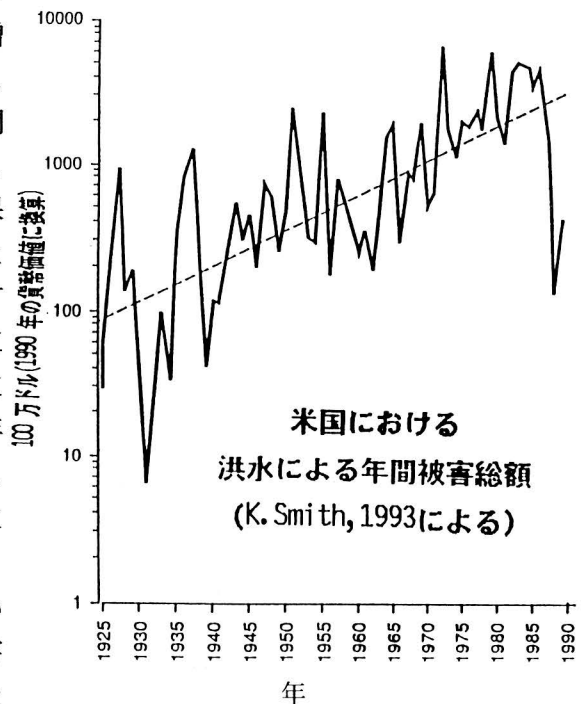


図2

契約の増加を反映しているのだ』とおっしゃっています。しかし、気象をやっている私にとって、問題は『地球温暖化に伴って大気の動きが激しくなるのかどうか、災害を引き起こすよう

な集中豪雨が激しさを増すのかどうか』という事でございます。この気象災害の増加に社会構造の変化が大きく影響していることは確かだと思います。災害を引き起こすような天気現象の激化も影響しているのではないかということに関して、今までまとまった研究はございませんでした。もしも、『温暖化とともに天気現象が激しくなる』と判れば、土木工事等の設計基準の変更が当然でてくるわけです。『今まで50年に1回の洪水と考えられていたのが、30年に1回起こる、今まで50年に1回の割合で300ミリの降雨と考えてたのが、実は地球温暖化に伴って500ミリになる』とすると、当然河川の堤防の嵩上げが必要になってくる。これは国家財政に大きく影響するような大土木工事の設計基準の変更を必要とします。あまりにも大きい社会的影響がありそうだという意味では、この種の研究はハッキリとした結果がでるまで、あまり大きい声で言わない方がいいのだら

うかとも思われます。しかし、scientificな形での研究結果の発表は、別に否定するつもりはないのです。

集中豪雨を起こす天気現象の水平規模は100km以下、台風でも数百kmで、地球の大きさに比べますと極端に小さい。地球温暖化がどうなるかという議論のための道具になっている「大気大循環モデル」の格子間隔はだいたい2~3百kmですので、そのような大循環モデルのシミュレーションで格子間隔以下の現象の一般的傾向を組織立てて研究するのが困難となる。そのために過去のデータを検討して何とかその傾向を、たとえば100年くらいの期間の傾向を見つけるという研究をせざるを得ないのです。

話はさしあたって集中豪雨ですが『昔に比べて集中豪雨が激しくなったかどうか』ということ。極端な現象は当然のことながら稀れにしか起こらない。稀れにしか起こらない例として図3は、ニューヨークのセントラル

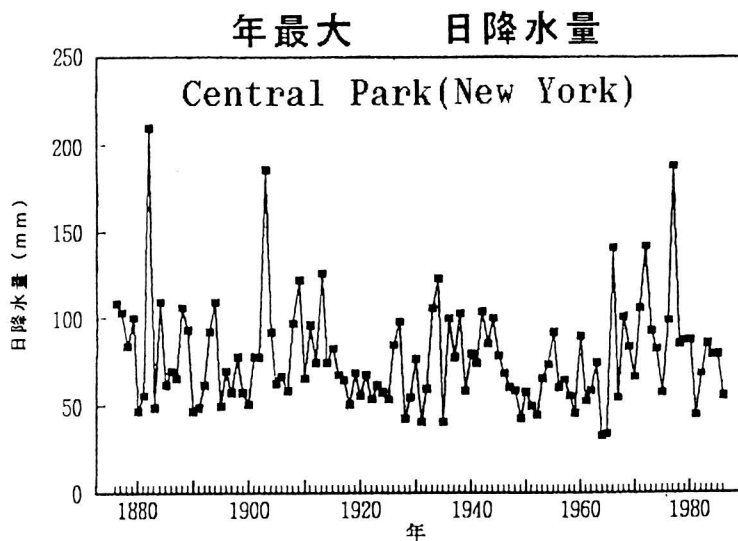


図3

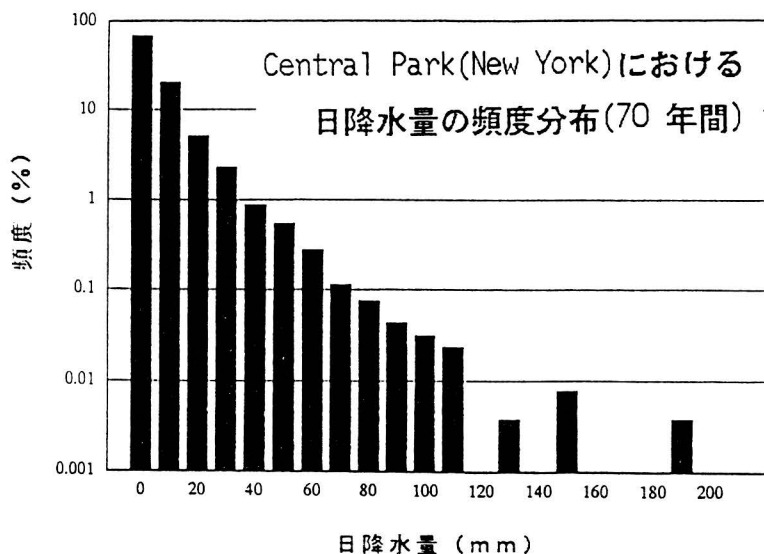


図 4

表 2. Sussex ストーリー

日雨量の再現期間の計算値と実際との食い違い (A.S.Potts [1982])

(1931~1980) のデータから計算

観測点 再現期間	10年	100年	1000年
Worthing	49.5 mm	67.6 mm	85.3 mm
Horsham	45.9 mm	62.0 mm	77.8 mm
Parham House	50.2 mm	66.7 mm	82.8 mm

Sussex での大雨の発生

年月日	場所	降水量	継続時間
1980年 9月 20日	Worthing	112.0 mm	10~11時間
1980年 10月 10日	Worthing	133.3 mm	20時間
1981年 4月 13日	Horsham	90.9 mm	8.5時間
1981年 6月 1日	Findon	67.7 mm	3.5時間

パークで過去 110 年間の毎日の日雨量の年間の最大値が年によってどうか変わったかを示しています。1875年以降の 110年間が示してあります。200ミリを超えるひどい雨の年もあれば、そうでない年もある。問題は『例えば150ミリを超えるような激しい雨がどのようなトレンドをもっていたか』です。これを議論しようとする、こんなデー

ターからトレンドは簡単に求められません。図4は頻度分布を示しています。横軸が日降水量の値、縦軸は頻度 (%) の対数です。問題はこの図の右端近くの非常に稀れにしか起こらない現象の長期変化を検出することです。

1ヶ所のデータでは当然こういうトレンドを検出するのは困難です。その例を示したのが表2です。イングラ

ンドの南部にサセックスという地域があります。その地域の3箇所での50年間のデータを基にして、10年に1回起こるひどい雨、あるいは100年や1000年に1回起こるような確率の日雨量が、どれくらいかを計算をした結果です。ところがこの計算をした後、1000年に1回しか降らない確率だったはずのものが、実は10ヶ月ほどの間に4回も降ったのです。これは1ヶ所のデータをもとにして、雨量の確率を求めることの危険性を示しています。別の表現をしますと、そういう統計がうそをつくということになります。統計的な有意性をきちんと確かめなかったためだといわざるをえません。1ヶ所のデータからトレンドを求めることの危険性を避けるために、複数箇所のデータで議論したらどうだろうか

ということになります。同じように、図5に日雨量の年最大値が年によってどう変わるかを示しています。京都のデータは実線、大阪のは破線で示しています。京都と大阪では当然雨の降り方も違います。多数の観測点のデータを取り扱うとしても、生やさしいことではありません。在来の統計手法では、トレンドの検出が難しいと言わざるをえないのです。

この種の問題は、1990年に出された国連のあるグループのレポート(IPCCと言う略称で呼んでいますが、日本語では「気候変動に関する政府間パネル」と呼んでいます)では、「極端な現象のトレンドに関して研究すべきだ」と記しています。今年出ましたIPCCの第2次レポートでは、実際にこの問題を取り上げています。最近の新

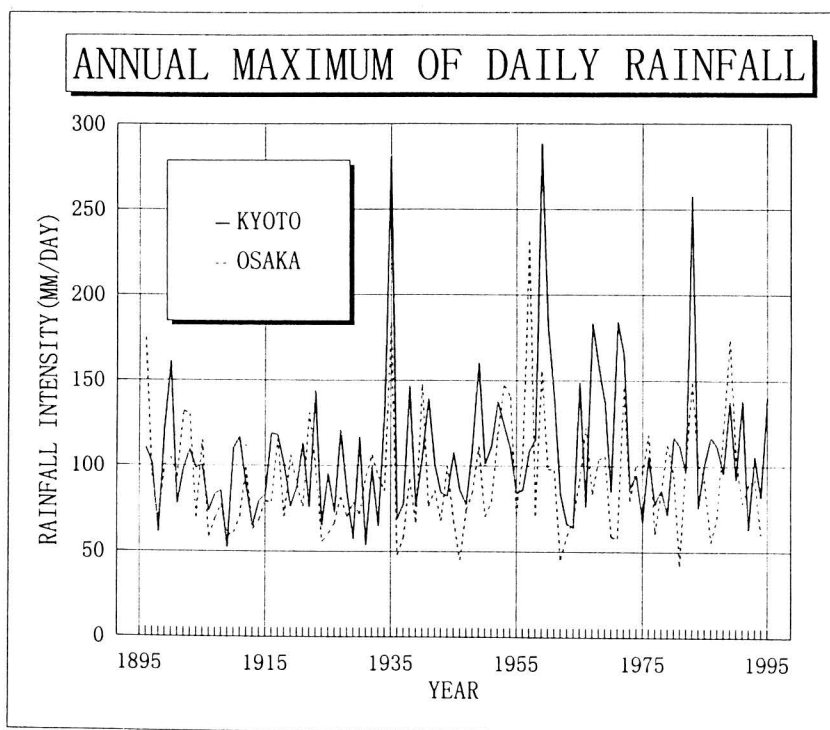


図 5

しい手法で、組織的な研究がこの年代前半に始まったと記しています。この IPCC の第 2 次レポートで紹介されている私たちの研究では、複数箇所のデータをいわば 1 つのサンプルとして取り扱うのです。それには次のような作業仮説を設定するのでございます。現象の激しさに長期傾向がない場合には、それぞれの複数の観測点での極値の発現時期の頻度が年代によって変わらないで一様である。現象の激しさが増す場合には、発現時期の頻度は最近の方が増えてくる、という作業仮説です。例えば西日本全体で 100 年に一度という大雨が、数十ヶ所の気象台のどこかで観測される。もしも、集中豪雨の上限に属するような激しさが全体として変わらなければ、頻度分布は、100 年間あまり変わらない。ところが、その集中豪雨の激しさが昔に比べて最近は酷くなっていれば、いわば記録破りの集中豪雨は昔に起こった頻度は少なく、最近が多い。これを逆に使って、長期トレンドを検出しようというのがこの作業仮説でございませう。集中豪雨はご存じだと思いますが、京都で起こって同時に広島で起こるということはありません。集中豪雨という現象に関して日本の気象観測網の個々の観測点は、相互無関係であり、またある場所でおこって次にどこかでおこる場合でも時間的には独立だとみなせませう。そういう意味で空間的にも、時間的にも独立だとみなせる現象に関して、上述の作業仮説が成り立つのかどうかを確かめることが必要です。乱数を使ったモンテカルロシミュレーションで有用性や

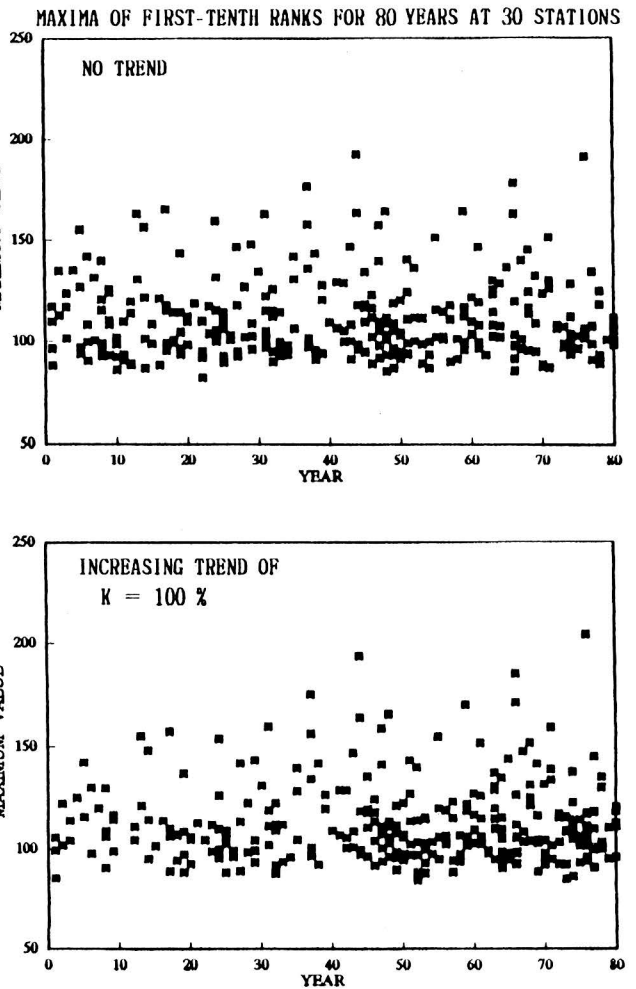


図 6

正当性をチェックすることができます。図 6 はモンテカルロシミュレーションで採用した疑似観測点の年間最大の日雨量が年によってどう変わったか例を示しています。この上のパネル (図 6) はトレンドのない場合です。下の場合には増加傾向があり 100 年間の標準偏差に相当する量が 100 年間に増加したという設定をしたものです。1ヶ所のデータを見ただけではトレンドがあるかどうか判断出来ないのです。

観測網でこのような状況を多くの観測点で見ますと、それぞれの観測点で

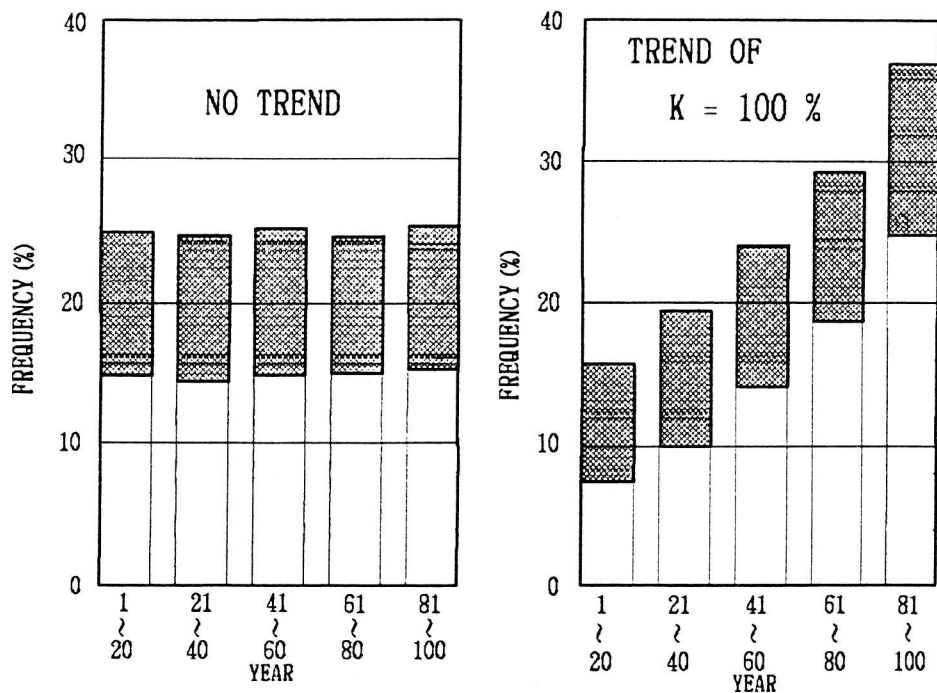


図7

100年間の最大値、この場合は第1位から第10位までとった場合ですが、どの年代に起こったか示しています。図7で影をつけた部分が95%信頼限界ですので、この範囲の値になる確率が95%だという事を意味しています。右の図はトレンドのある場合ですが、初めの10年間で比べますと、最後の10年間は明らかに記録更新の酷い雨が頻繁に降ったということでございます。このように、多年の間で最大の降水量がいつ起こったかを複数の観測点から成る観測網データーについて見ることによって、例えば日本ではこのトレンドがあるのか、ないのかという判断ができるのです。結論的には日本の55ヶ所のデーターを各20年ごとにくくりましたが、この場合は第1位から第3位までの発生頻度でございませう。あきらかに昔に比べると最近増加してきたとい

うことが言えますし、統計的にも有意な増加でございませう。

### 〈豪雨激化の原因〉

先ほど申し上げました空間と時間スケールが全く違うもの間にどうも関係がありそうと言うことになります。このようなトレンドの原因は何だろうか。今までお話ししましたように、データー解析の結果とは一応独立に、炭酸ガスが増えたときに地球の気候がどう変わるかというシミュレーションがなされています。そのシミュレーションそれ自身では集中豪雨の増加の議論は難しいですが、実は気象庁の付属の気象研究所のグループが『炭酸ガスが増えたとき、雨の降り方はどう変わるのか』を議論しました。その結果、炭酸ガスが増えて気温が上昇しますと、地球全体として雨が多くなります。こ

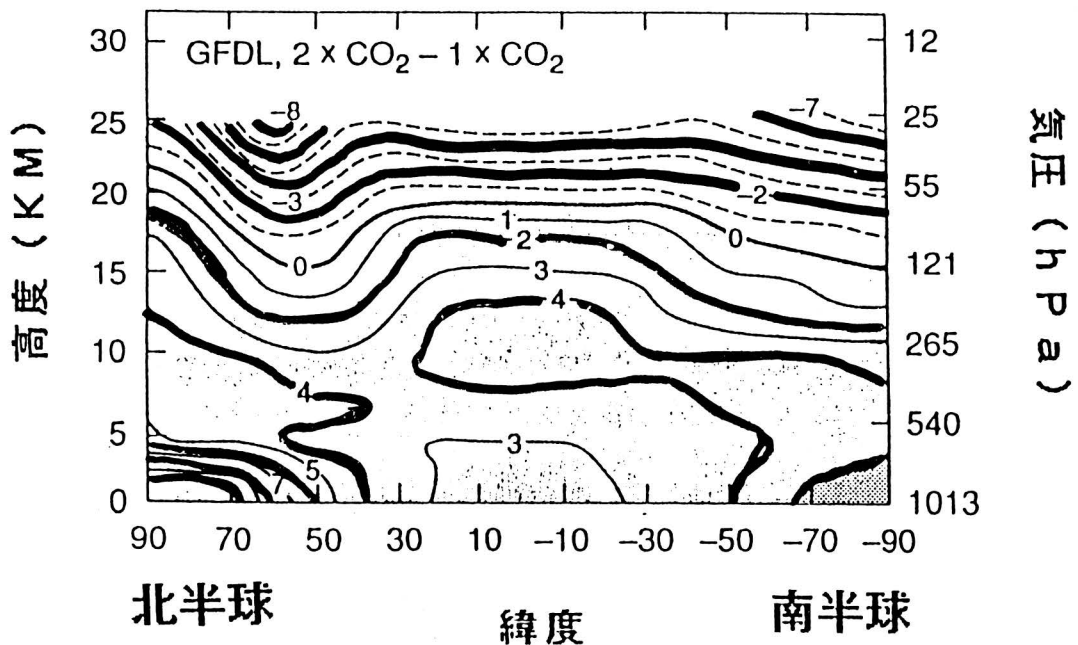


これは気温上昇に伴って飽和水蒸気量が増えることで空気中の水蒸気が増え、その結果雨が増えることまでは理解しやすいのです。

実は問題は雨の降りかたです。温暖化が進行するとわか雨が増えると同時に、地雨（連続的な雨）の降る面積が狭くなるというのです。結論的には、炭酸ガスが増えることによっておこる地球温暖化の結果として、地球全体としての雨量は増えるが、降水面積が減る。集中豪雨の激しさはこれにつながるものでありまして、やはり地球温暖化が上述のトレンドの最有力の原因といわざざるを得ないだろうと思います。降水面積の減る原因が温度変化である

ことを理解するために図8を掲げます。この図は温暖化が起こったときの温度上昇の分布図であります。横軸が緯度で北半球・赤道・南半球であり、縦軸は高さでございます。炭酸ガスが2倍になったときに、対流圏の下の方での温暖化は大きく、上の方ではむしろ少ないか少ないしは冷却が起こる。下層で温度が高くなるすなわち空気の密度が軽くなる。上層はそうでない。となりますと当然、対流が起こりやすくなり、そして、対流性の降水が増え、空間的な集中豪雨が増す。このように集中豪雨の激しさの増すことが、温暖化の高度分布から理解できる。それでは具体的にどの程度激しくなるのかというこ

温暖化の高度・緯度分布



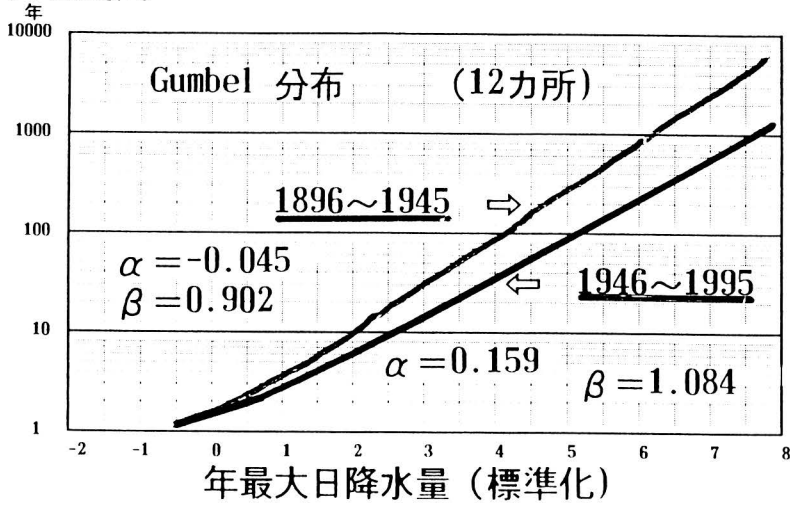
CO<sub>2</sub> 倍増時の昇温量 (°C) (12月～2月)

昇温量：上部対流圏で小、下部対流圏で大（熱帯を除く）⇒対流活動が活発化

図8



# 再現期間



Sheet 1

	50年確率日降水量 (mm)	
	1896~1945	1946~1995
標準	3.5	4.4
函館	133.5	151.5
東京	240.1	278.5
熊本	323.8	377.9

図9

とですが、詳細は省いて、結果だけを述べます。図9の横軸は年最大日降水量で、その単位は多数の箇所のデータを一括処理するために標準化したものです。縦軸はリターンペリオド(再現期間)です。左下から右上へ伸びた2本の太い曲線は、それぞれ前半の50年(1896~1945年)と後半の50年(1946~1995年)に対応しています。「100年に1回しか起こらない豪雨」の標準化値は前半では4、ところが最近では、5くらいになりました。この下の表では、50年間の確率を示しております。例えば東京では、その1945年以前

の50年間では、240ミリというのが50年に1回起こる確率。ところが最近では、280ミリ近くに増えているのです。熊本、函館も示しますが、このような統計結果でございまして、もしも「これが確かなものであり、しかも、その傾向が将来続く」となりますと冒頭で申しましたように、土木工事の設計基準の見直しにつながるわけです。しかし、このようなトレンドが、日本だけなのかどうか。実は米国とか中国或いはオーストラリアの一部でも確認されています。どの程度グローバルなものか、それが本当にその地球温暖化の結

果としておこったものか、最も確からしい原因が温暖化だと私は推測しましたが、そのような推測をより強固なものにするためには、コンピューターを最大限に使ってモデルシミュレーションで確かめる必要があるだろうと考えます。

### 〈台風活動の動向〉

集中豪雨の話は以上で切り上げることにしまして、次に取り上げるのは『台風の激しさが温暖化に伴って増すのかどうか』という問題でございます。常識的にいいますと、先ほども申しましたように、現在の気候シミュレーションで採用されているモデルの空間解像度は台風に比べて余りにも低いので、議論は難しい。実際に台風やハリケーンが発生するのは熱帯の海上、しかも26℃以上の海面水温の海域に限られています。これは万人の認めるところです。従って、『地球温暖化が進んで、26℃の海域が広れば、恐らく台風の発生は増える、或いは激しくなるだろう』という推測は常識的です。それを、米国MITのエマニエルが簡単なモデルを用いて計算しました。台風やハリケーンでは、下層の空気は逆時計回りの回転をしながら中心の方へ移動する。中心近くで上昇して上空の成層圏の近くで外へ流出する流れがございます。空気は下層で海面上を中心の方へ吹き込む間に多量の熱や水蒸気を海からもらいます。そして上空で、いわゆる放射冷却で熱を失います。ですから比較的温度の高い下層で熱をもらい、上空の温度の低いところで熱を失うと

という意味のいわゆる「熱エンジン」として台風は動いているのです。地球温暖化に伴って海面の温度が高くなれば、熱エンジンがより激しく作動するだろうというのがエマニエルの主張点でございます。彼が1987年に出したモデルですが、地球温暖化と海面水温の上昇に伴うエネルギーの供給増加で、台風の勢力の増加が考えられます。たとえば海面水温の2℃の上昇で最大風速が10 m/sの増加或いは中心気圧が25 hpaの低下になるという計算結果を出しています。

ところが、そういう単純なモデルでハリケーンの状態を議論できる筈はないというのが、93年にメキシコで開かれたシンポジウムの結論でした。イギリスのライトヒル先生が委員長になってまとめられた、このシンポジウムの報告では、エマニエルのモデルがあまりにも簡単すぎて、そして彼の結論があまりにも明快だったので、世の中を惑わすような論文だという非常に手厳しい批判がまとめられたわけです。このシンポジウムは結論的には海面昇温の影響は否定できないが、非常に大きい年々変動のために確定的なことは云えないのが現状だということでした。非常に慎重に研究を進める科学者の多くは、この結論に異論はないと思います。事実国連のIPCC(上述)の今年度の報告書でも、だいたいこれに近いことをまとめています。図10(次頁)はハリケーンの強さが海面水温でどう変わるかを示しています。下の図は北西太平洋の台風であります。こんなデータでは、海面水温の上昇に伴って台

風或いはハリケーンの強さが強くなるということはとうてい言えませんのでライトヒル先生の結論はもっともです。

実はこれでおしまいだったら、私はこの問題を取り上げませんでした、最近注目すべき成果が発表されました。それは米国海洋大気庁の科学者が2年前に発表したものです。これは、「257個のハリケーンの7000回以上の状況を取り上げています。15から30℃近くまでの海面水温でハリケーンの中の最大風速がどういふふうに分布したか」ということを示しています(図11)。それ

ぞれの海面水温に対してハリケーンの50%の強度は太い実線で示しています。海面水温が少々高くなっても、低くなっても半分ぐらいは最大風速は変わりません。この点は先ほどのライトヒル先生達の結論と合致するわけです。

例えば20℃の海面水温の時に、大部分は20 m/s、ところが95パーセンタイルは30 m/s近いのです。95パーセンタイルに着目しますと海面水温の上昇に伴って明らかに上昇しています。計算では、50パーセンタイルは海面水温に無関係だが、最大値95とか99パーセンタイルは海面水温に関係している。これは過去の事実として受け入れるものであります。しかし、炭酸ガスの増加等によって地球温暖化が進むと、恐らく海面水温が高くなり、この99%或いは最大値という上限が頻繁に起こる可能性があるということでございます。こう考えますと、『将来この地球はどうなるか』という答えではありませんが、過去のデーター解析をしますと、どんどん地球温暖化が進むことによって、熱帯低気圧の上限の勢力が強くなりそうだし、降水強度、集中豪雨等の上限も激しくなりそうだということです。先ほどの、不破先生のお話は近未来でしたけれども、私の場合は、未来ではなくて過去に留まっています。それを未来の問題に外挿するためには、さらなる研究が必要だと痛感している昨今でございます。

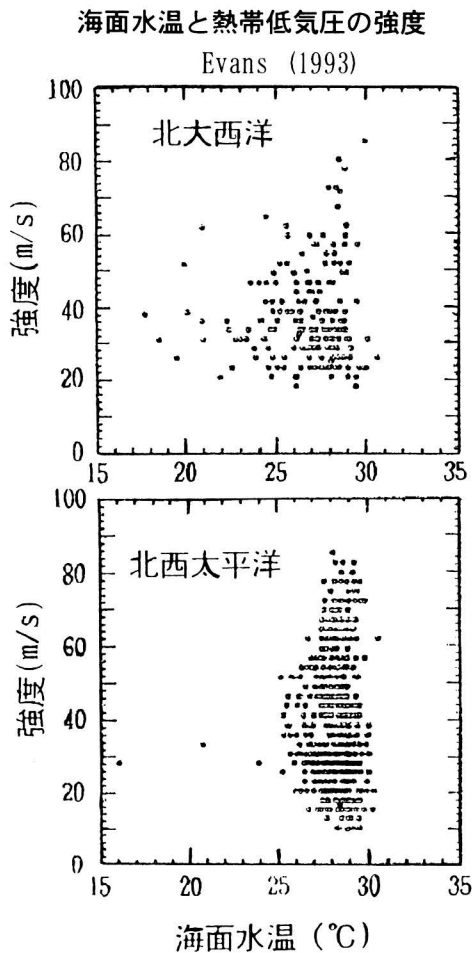
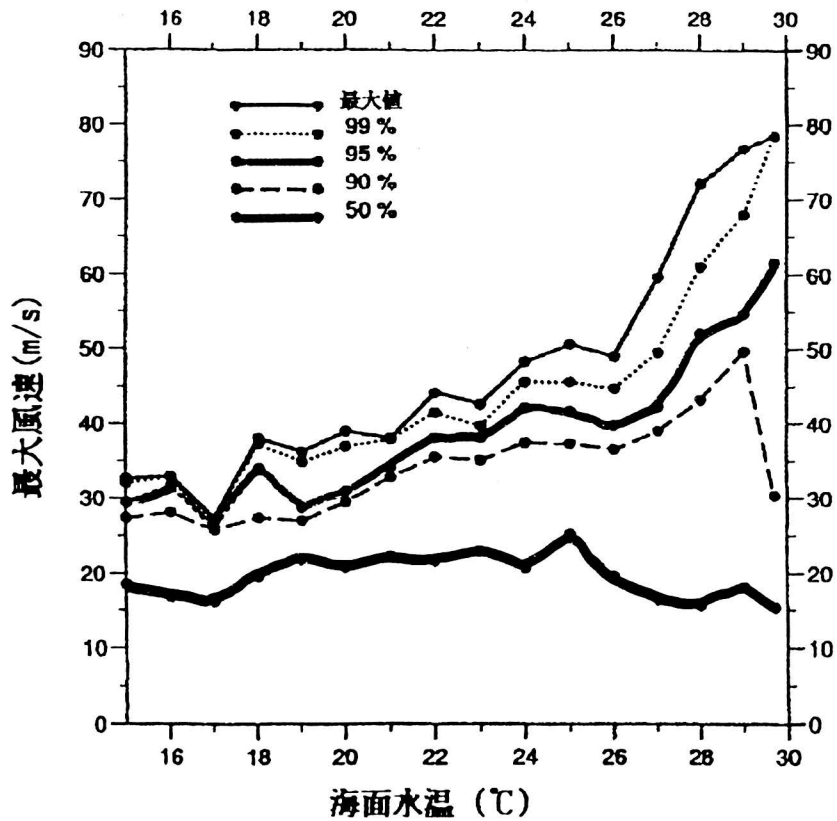


図 10



海面水温別のハリケーン内最大風速の確率分布

最大値：海面水温に関係      50%：海面水温に無関係  
 257個のハリケーンの7110回の観測 DeMaria & Kaplan (1994) の研究

図 11