

本田財団レポート No.35 「エネルギーと環境」

横浜国立大学 環境科学研究センター 教授
田川博章

本田財団レポート

No.1 「ディスカバリー国際シンポジウム ローマ1977」の報告 電気通信大学教授 合田周平	昭53.5	No.19 自動車事故回避のノウハウ 成蹊大学教授 江守一郎	昭55.10
No.2 異文化間のコミュニケーションの問題をめぐって 東京大学教授 公文俊平	昭53.6	No.20 '80年代—国際経済の課題 日本短波放送専務取締役 小島章伸	昭55.11
No.3 生産の時代から交流の時代へ 東京大学教授 木村尚三郎	昭53.8	No.21 技術と文化 I V A事務総長 グナー・ハンペリュース	昭55.12
No.4 語り言葉としての日本語 劇団四季主宰 浅利慶太	昭53.10	No.22 明治におけるエコ・テクノロジー 山本書店主 山本七平	昭56.5
No.5 コミュニケーション技術の未来 電気通信科学財团理事長 白根禮吉	昭54.3	No.23 西ドイツから見た日本 電気通信大学教授 西尾幹二	昭56.6
No.6 「ディスカバリー国際シンポジウム パリ1978」の報告 電気通信大学教授 合田周平	昭54.4	No.24 中国の現状と将来 東京外国语大学教授 中嶋嶺雄	昭56.9
No.7 科学は進歩するのか変化するのか 東京大学助教授 村上陽一郎	昭54.4	No.25 アメリカ人から見た日本及び日本式ビジネス オハイオ州立大学教授 ブラッドレイ・リチャードソン	昭56.10
No.8 ヨーロッパから見た日本 N H K解説委員室主幹 山室英男	昭54.5	No.26 人々のニーズに効果的に応える技術 GE研究開発センターコンサルタント ハロルド・チェスナット	昭57.1
No.9 最近の国際政治における問題について 京都大学教授 高坂正堯	昭54.6	No.27 ライフサイエンス 佛三菱化成生命科学研究所人間自然研究部長 中村桂子	昭57.3
No.10 分散型システムについて 東京大学教授 石井威望	昭54.9	No.28 「鍊金術 昔と今」 理化学研究所地球化学研究室 島 誠	昭57.4
No.11 「ディスカバリー国際シンポジウム ストックホルム1979」の報告 電気通信大学教授 合田周平	昭54.11	No.29 「産業用ロボットに対する意見」 東京工業大学教授 森 政弘	昭57.7
No.12 公共政策形成の問題点 埼玉大学教授 吉村 融	昭55.1	No.30 「腕に技能をもった人材育成」 労働省職業訓練局海外技術協力室長 木全ミツ	昭57.7
No.13 医学と工学の対話 東京大学教授 澤美和彦	昭55.1	No.31 「日本の研究開発」 総合研究開発機構(NIRA)理事長 下河辺 淳	昭57.10
No.14 心の問題と工学 東京工業大学教授 寺野寿郎	昭55.2	No.32 「自由経済下での技術者の役割」 ケンブリッジ大学名誉教授 ジョン F. コールズ	昭57.12
No.15 最近の国際情勢から N H K解説委員室主幹 山室英男	昭55.4	No.33 「日本人と西洋人」 東京大学文学部教授 高階秀爾	昭58.1
No.16 コミュニケーション技術とその技術の進歩 M I T教授 イシエル・デ・ソラ・ブルー	昭55.5	No.34 「ディスカバリー国際シンポジウム コロンバスオハイオ1982」報告 電気通信大学教授 合田周平	昭58.2
No.17 寿命 東京大学教授 古川俊之	昭55.5	No.35 「エネルギーと環境」 横浜国立大学環境科学研究センター教授 田川博章	昭58.4
No.18 日本に対する肯定と否定 東京大学教授 辻村 明	昭55.7		

講師略歴

田川博章 (たがわ ひろあき)

昭和 6 年 東京に生まれる。

昭和29年 横浜国立大学 工学部を卒業。

昭和31年 東京大学大学院化学系研究科(修士)を修了。

昭和54年 横浜国立大学 環境科学研究センター教授 現在に至る。

専 攻 汚染拡散学、固体化学、エネルギー化学

著書(共著) 「原子炉材料ハンドブック」(日刊工業新聞社)

「新エネルギーシステムー太陽エネルギー・水素への道ー」

監訳 (技報堂出版)

「エネルギー材料工学(総合エネルギー講座第8巻)」(オーム社)

「水質汚濁・土壤汚染(安全工学講座第8巻)」(海文堂)

「金属便覧—改訂第4版—」(丸善)

このレポートは昭和58年1月27日、パレスホテル
において行なわれた第27回本田財団懇談会の講演の
要旨をまとめたものです。

はじめに

本日は「エネルギーと環境」という題についてお話ししたいと思いますが、かなり大きな題ですので、特にエネルギーを大量に発生・消費すると環境にどのような影響を与えるか、ということを中心に申し上げます。

人類がエネルギーを使い始めましたのは、火を使い出した時ではないかと思います。日本では、恐らく繩文時代の前になるでしょうから、今から何万年かの昔のことです。当時は薪を拾い集めてこれを燃やし、食物を焼いて食べるとか、暖をとるとか、そういうために使ったことだと思います。文明の発展と共に生活水準が次第に向上し、エネルギーの消費量も増加します。それも単に日常生活の手段として用いるというだけではなく、人間の道具を作るためにエネルギーを使う、という具合にエネルギーの消費が増えてきました。それに伴い、エネルギー源は薪から石炭に変ります。石炭の使用は長い期間続きまして、この間に蒸気機関が発明され、それが契機となって産業革命が起り、工業が発達しまして、エネルギー多消費時代に移って行くわけです。

エネルギーの使用量が少なかった時代には、この面からの環境とのかかわり合いはほとんどありませんでした。技術・工業が発展しますとエネルギーの使用量も増加しまして、遂には局地的に自然のエネルギー密度に匹敵する位の大きさにまでなり、環境に大きな影響を与えるようになりました。

環境を地球の規模から捉えますと、人類の消費するエネルギーの大きさが太陽エネルギーと比べるとどの程度の大きさになるのか、また化石燃料を燃やしてエネルギーを発生する段階で炭酸ガスですか、硫黄酸化物・窒素酸化物を環境にどの位放出して、それが地球上での物質の循環とどのようなかわりを持つのか、などが問題点として浮び上ってきます。これらのこととは今後人類がエネルギーを使用し、また新しいエネルギー源を探し求める場合にも、重要な問題になるものと考えられます。そこで、本日はかような観点から話を進めたいと思います。



自然のエネルギー

●太陽エネルギー

人類はもともと太陽エネルギーの恩恵のもとに生存してきていますが、現在も、将来にわたっても、この恩恵を受けて生存を続けるに違いないと思います。更に、石炭とか石油という地球上に蓄積された過去の太陽エネルギーをも消費してゐるわけです。

それでは地球にはどの位の量の太陽エネルギーが降り注いでいるのか、そ

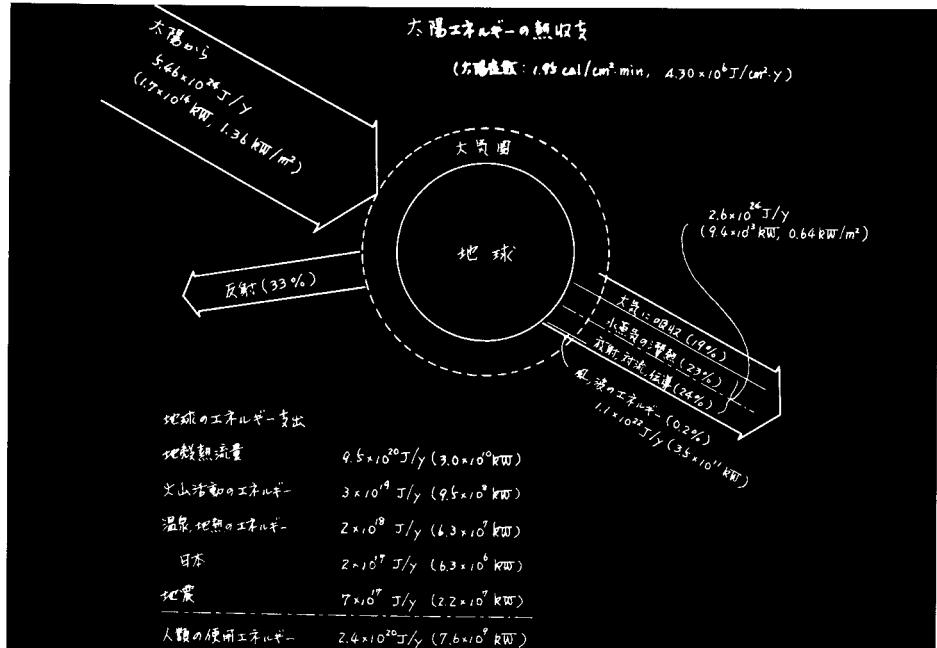


図 1

れを図1に示します。地球には太陽から1分間に1平方センチメートル当り約2カロリーのエネルギーが入ってきます。1カロリーの熱は1立方センチメートルの水の温度を1°C上げることができます。この太陽エネルギーを直接、熱として利用する装置が太陽熱温水器であります。さて、地球に入射するエネルギーの総量は1年間に 5.46×10^{24} ジュール($4,184$ ジュールは1カロリーですから、換算すると)になります。このエネルギーは地表に達する前に、まず地球を巻く大気の外側において成層圏の雲などの反射によりまして、33パーセントが宇宙に戻りまして、67パーセントが大気中に入ります。次に大気を通過する間にも19パーセントが吸収されます。これは大気を暖めるために使われます。結局残りの47パーセント、すなわち、もとの太陽エネルギーの約半分が地表に達しまして、地面を暖めたり、海水を暖めたり、あるいは水を蒸発させるのに使われることになります。風や波も、もとは陸や海が太陽エネルギーを吸収することによって起りますが、この量は太陽エネルギー全体の0.2パーセント程度に過ぎません。

人類が1年間に使うエネルギーは 2.4×10^{20} ジュールですが、これは風とか波のエネルギーの凡そ $1/50$ ですので、人類の使用するエネルギーは局地的にはこの自然のエネルギーに匹敵する位の大きさになっていることが容易に想像できます。

植物の光合成に使われるエネルギー、すなわち植物が育ったためのエネルギーは風や波を起すエネルギーよりも更に小さく、太陽エネルギーの全体の0.02パーセント程度です。地表に達するエネルギーの大きさからみると、植物に変わるエネルギーの量は僅かでして、ほとんどは水を蒸発させたり、地面を暖めるとかの物理的変化に使われてしまっています。

地球に入射した太陽エネルギーは、一旦吸収されたのち、今度はもっと波

長い長いと申しますか、温度の低いエネルギーに変って宇宙に戻ります。地球は入ってくるエネルギーと出てゆくエネルギーとがバランスして一定の温度に保たれています。

● 地球自身からのエネルギー

地球には外から来るエネルギーの外に自分自身でもエネルギーをつくり出し放しています。熱源は原子炉の熱料と同じ元素のウラン・トリウムなどの核分裂によるエネルギーです。この地球自身のエネルギーは太陽エネルギーに比べるとかなり小さいのですが、造山運動や火山活動、あるいは地震などのエネルギーの源泉になっています。結局は熱エネルギーとして宇宙に出てゆきます。

温泉・地熱などの熱エネルギーは風・波のエネルギーの約1/5000の大きさです。このうちの10パーセント位が日本にあります。上手に使いますと代替エネルギー源として有用ですが、我国の消費エネルギーの大きさに比べますとそれほど大きくはありません。

● 植物生産のエネルギー

地球に入射する太陽エネルギーのうち0.02パーセントが光合成に使われていることは既にお話しましたが、これが植物の形になるとどの位の量になるのかを図2に示します。まず毎年生産される植物量は乾燥した状態で1600億トンになります。このうち寿命の長い樹木などは森林として蓄積されます。その全量を見積もってみると約2兆トンになります。エネルギーに換算し

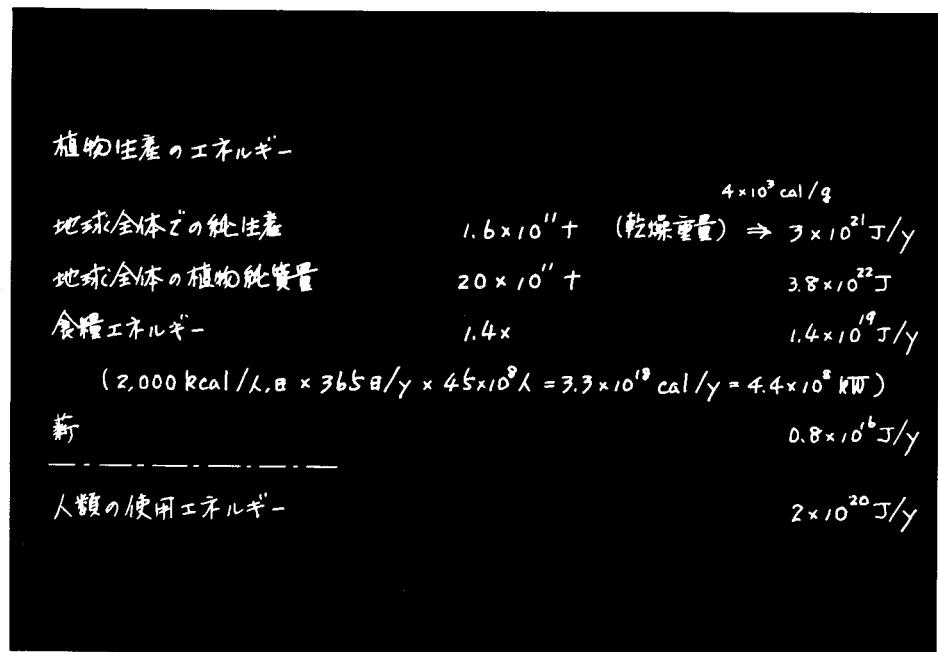


図2

ますと、植物1グラムが4キロカロリーになりますので、全体では 3.8×10^{22} ジュールになります。

また毎年生産される植物のうち食糧として使われるエネルギーがどの位になるかを計算してみます。1人が1日にどの位の食物を食べているかということから見積るのですが、エネルギーとして日本人では1人1日に平均約2500キロカロリー、アメリカ人では約3300キロカロリーを食べています。発展途上国ではこれよりもかなり少ないとこともありますので、少な目に見積りまして1日2000キロカロリーとして、これに365を掛けますと1人が1年に食べるエネルギー量になります。更に45億人を掛けますと、人類が1年間に食べる食糧のエネルギー換算値になります。これは 1.4×10^{19} ジュールですから、1年間に生育する植物全体の約1/200が食糧エネルギーになっているということがわかります。ところが、この数字は必要なエネルギーをすべて植物として取った時の話でありまして、肉食にいたしますとその分だけエネルギーが余計に要ります。すなわち草食動物を肉食動物が食べ、その肉食動物を人間が食べるというようになりますと、食糧として有効に利用されるエネルギーが各段階ごとに約1/10に落ちてしまいます。従いまして食糧エネルギーが植物生産の1/200と申しましたが、実はこの数字はかなり控え目でありまして、その意味では食糧のゆとりはそれほど大きくなはないのではないかと思われます。

また人類の使用エネルギーは1年に 2×10^{20} ジュールですが、これは植物生産の1/15に相当します。従いまして森林として保存することも必要でしょうし、現在世界で使われているエネルギーをすべて薪などの植物のエネルギーに置き換えることは大変難かしいことになります。

●自然エネルギーの開発

サンシャイン計画では、化石燃料に代るエネルギーとして太陽エネルギー・地熱などの自然エネルギーの開発を行なっています。それがどの程度の規模になるかを示したのが図3です。

自然エネルギーの中で古くから利用されているものに水力発電があります。設備容量として2500万キロワットあり、総発電容量の8パーセントになります。かつては発電といいますと水力発電を指したのですが、火力・原子力の比重が大きくなりまして、相対的に発電に占める割合が下りました。風力発電は水力発電の1000倍程度の潜在能力があります。波のエネルギーもかなり大きく、黒潮だけでも水力発電程度の潜在的な能力を持っていきます。

太陽熱利用の実際は見積りようがないのですが、お湯として大規模に使っているのは4100件程度です。冷暖房では500件位が試験的に使われていますが、利用の範囲はもっと拡がるように思えます。

地熱エネルギーの利用としては現在、松川、大館など6ヶ所に発電所があります。17万キロワットの発電をしています。いずれも蒸気の形で利用する

	潜在量	現在の設備容量	計画設備容量	環境問題
太陽エネルギー (我国に直接入射する太陽エネルギー: $2.1 \times 10^{10} \text{ kW}$)				
水力発電			$2.5 \times 10^7 \text{ kW}$	
風力発電	$> 10.7 \text{ kW}$			
波浪発電	$5 \sim 140 \times 10^4 \text{ kW}$			
波浪発電	10^7 kW			
海洋温度差発電				
太陽熱冷暖房・給湯		給湯 4100件		
太陽熱発電		給湯冷暖房 500件		
太陽熱電子発電(太陽電池)		$10^3 \text{ kW} (k=2)$		
地熱エネルギー				
蒸気	$1.3 \times 10^8 \text{ kW}$	$1.7 \times 10^5 \text{ kW}$ (在来) 大井 大沼 鉄道、八幡島温泉)		
浅部熱水系	$5 \times 10^7 \text{ kW}$			

図 3

ものですが、潜在的には約1000倍の1億3000万キロワットが見込まれています。ただ局地的に見ますとかなりのエネルギー密度になりますので、どの程度まで利用できるか、地球環境的にみて検討の必要がありそうです。

● 我国の一次エネルギー供給

この図4は、昭和54年度までのエネルギーの使用実績と、今後の需給見通しを示したもので、54年度では全エネルギーの70パーセントが石油です。

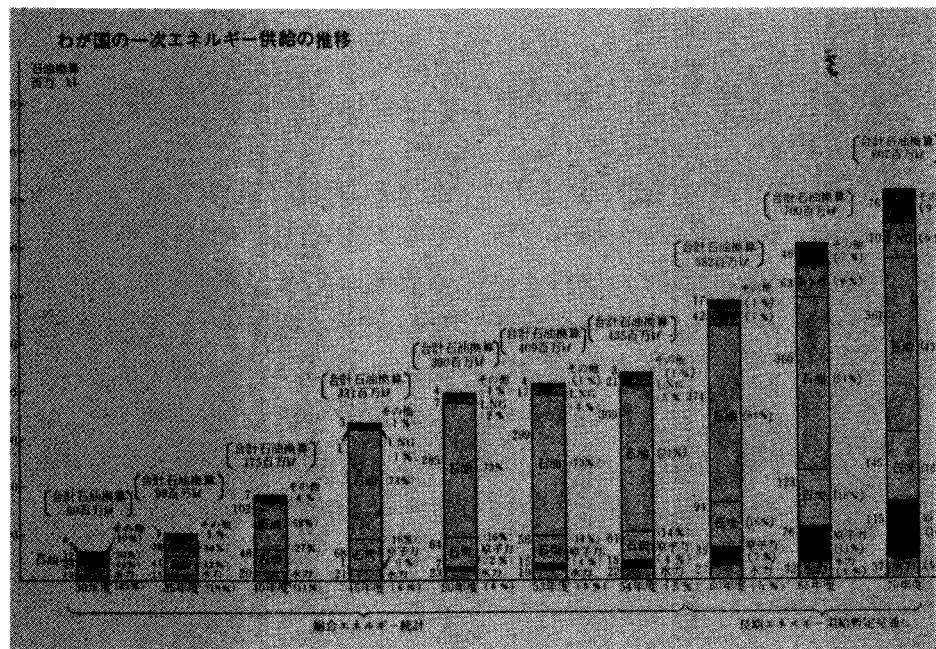


図 4

石炭は14パーセント、原子力が4パーセント程度です。原子力はすべて発電に使われています。

現状では石油の消費割合がかなり高い上に、日本全体としてのエネルギー消費量が増加して行きますので、国として石油の割合を減らしたいという強い願望があります。そのために石炭ですか、原子力ですか、あるいは自然エネルギーへの変換を一そう進める必要があります。

実際にエネルギーがどういう風に使われているか、エネルギーの使用の流れを図5に示します。この図は8年位前のデータですから、数値は現在とは

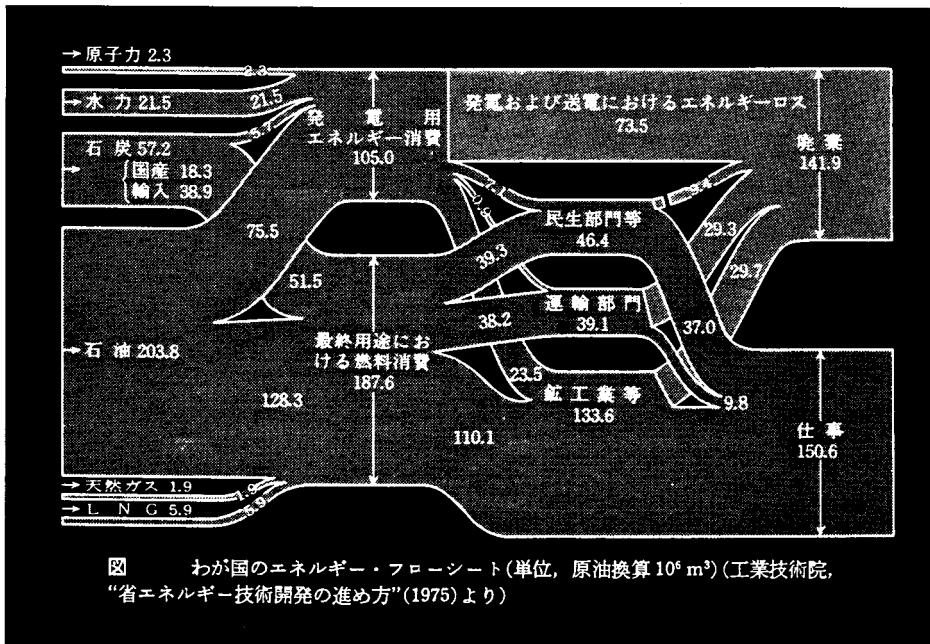


図 わが国のエネルギー・フローシート(単位、原油換算 10^6 m^3) (工業技術院
“省エネルギー技術開発の進め方”(1975)より)

図 5

少々違うと思いますが、利用の内訳はそれほど變ってはいないと思います。この図の上の部分が発電、下の部分がいわゆる燃料としての用途でして、これには工業加熱用の重油ですか自動車用のガソリン・軽油あるいは家庭で使う暖房用ガス・燈油などが含まれます。発電用と燃料用の比率はほぼ1対2になっています。発電用のエネルギーはすべてが電力に變るわけではありません。電気エネルギーに變る割合は $\frac{1}{3}$ であります、残りの $\frac{2}{3}$ は熱として捨ててしまいます。燃料の場合も空間を暖めるとか、あるいは自動車とか鉄道などの運輸部門でも実際の仕事としてはせいぜい20パーセント程度でして、あとは熱として捨ててしまいます。

捨てた熱と何らかの仕事あるいは利用したエネルギーを比べますと、ほぼ1対1になります。エネルギー消費が増えましても、有効なエネルギーは半分にしかなりませんので、この捨てているエネルギーを少しでも有効に使おうとする見直しが重要になります。

エネルギー資源の変遷

エネルギー源として、このように多量の石油に依存しているわけですが、石油の生産量と新規発見量については図6に示すような状況になっています。棒グラフが発見量を、実線が生産量を示します。新規発見量は1960年を境に次第に減少してきていますが、特に中東の減少は特徴的であります。「その他」は北海油田・メキシコなどを指します。オイルショックに代表される将来の石油供給の危惧はこのような背景があったからだと思います。

今まで人類が薪を手にした頃から石炭を経て石油へとエネルギー源が変ってきました。この変遷の様子を図7に示します。石炭の時代はかなり長期に

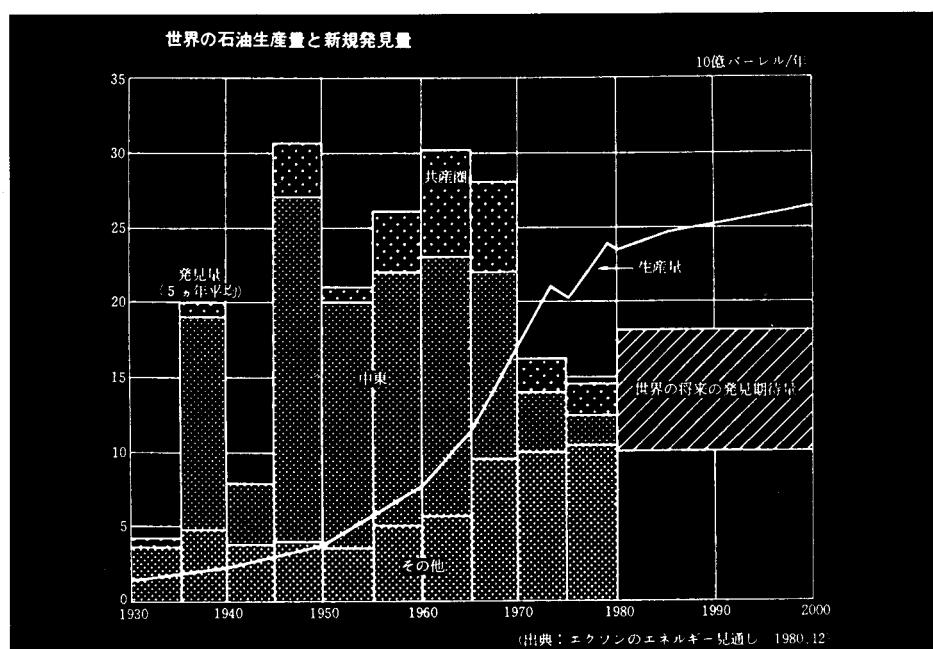


図6

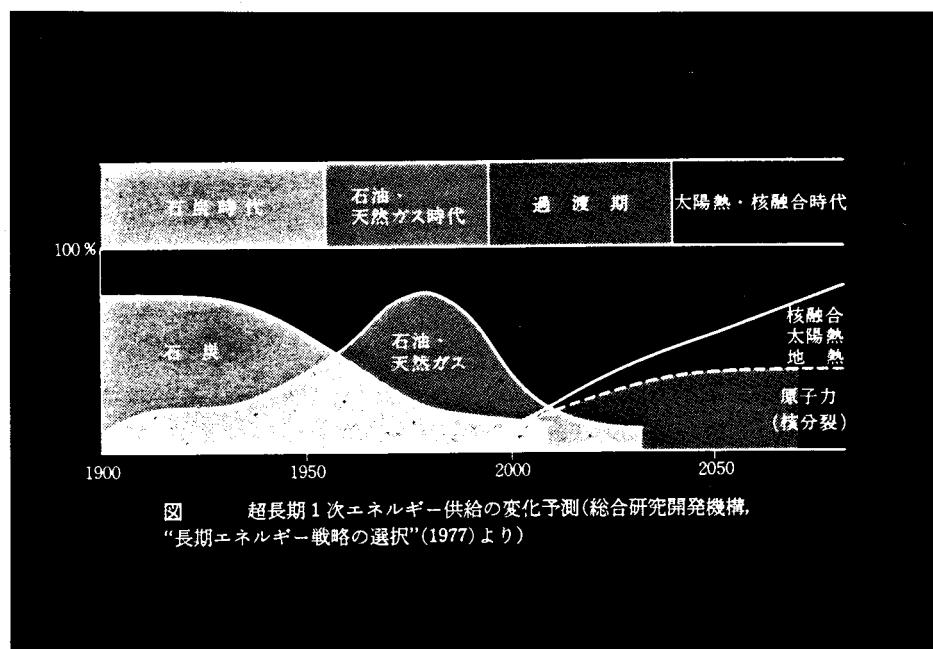


図7 超長期1次エネルギー供給の変化予測(総合研究開発機構
“長期エネルギー戦略の選択”(1977)より)

図7

わたりまして、蒸気機関が発明されて産業革命が起りましたのも石炭の時代のことです。石炭を多量に使用するためには、固体であるための輸送の不便さ・煤煙の発生・灰の処理などの不便さがあったために、採掘が容易で取扱いの便利な、また同じ体積では発熱量の高い石油・天然ガスに変わってきました。我国では実際に石油が多量に使われ始めたのは昭和30年代の前半であったと思います。

長期的にみると石油の供給は楽観できませんので、原子力あるいは自然エネルギーの利用が始まりました。原子力については、もともとアメリカは軍事目的のために原子力開発をしたのですが、1953年に原子力平和宣言を行いましたが、この宣言以後、我国を含めて各国が原子力利用の研究開発を始めるようになります。現在ではかなりのエネルギーが供給されるようになってきております。我国では現在稼動中の原子力発電所の数は14ありますが、発電量全体に占める割合は20パーセントにもなります。特に関西電力ではこの割合が高く、30パーセントが原子力発電によっています。

エネルギー源はこのように変ってきましたが、エネルギーを多量に使用するところ、例えば発電所・重化学の工場あるいは幹線道路を走る自動車などは局地的にエネルギーを発生しますので、自然のエネルギーとのバランスが崩れるという現象が起るようになります。これが環境問題になるわけです。

例として100万キロワットの発電所を取り上げてみます(図8)。まず燃料の使用量を比べてみると、石油火力の場合には年間120ないし130万トンになりますが、石炭では凡そ2倍の210万トンから290万トンになります。実際に1日に1万トン近くの石炭を燃やすわけです。それに伴って多量の石炭灰が発生します。原子力発電の場合にはウランとして40ないし50キログラムです

出力100万kW発電所における各種燃料の比較			
項目	石油(液体)	石炭	原子力
燃料使用量	120~130万トン/年	210~290万トン/年	40~50kg/年
発熱量	10,000~11,000 kcal/kg	5,000~7,000 kcal/kg	$4.8 \times 10^{12} \text{ kcal/kg}$ (U-235)
硫黄含有量(%)	0.3~3.0	0.3~3.0	放射性廃棄物
燃焼排ガス量($10^4 \text{ Nm}^3/\text{h}$)	260	320	軽水炉 $100\sim 500 \text{ m}^3$
SO_x 排出量(Nm^3/h)	445~4450	737~7370	再処理から
濃度(ppm)(脱硫後)	45~445 (5~45)	74~737 (7~74)	高レベル 3 m^3
NO_x 排出量(Nm^3/h)	260	800	低レベル $10\sim 100 \text{ m}^3$
濃度(ppm)(脱硫後)	100 (20)	250 (50)	アリフ $1\sim 10 \text{ m}^3$

図8

から、燃料の輸送面ではかなりのメリットが生じます。発電所では燃料を燃やして発生する熱を電気エネルギーに変えるのですが、電気エネルギーに変わるのは全熱エネルギーの30ないし40パーセントでして、残りの60ないし70パーセントは環境に捨てられています。これは主として温排水の形で放出されますので、魚とか海草とかの生態系の変化として現われる場合もでてきます。都市ではこの廃熱も加わってヒートアイランドという現象が見られます。

エネルギー使用が環境に与える影響

化石燃料を燃やしますと、炭酸ガスを多量に含んだ排ガスが出ます。100万キロワットの発電所ですと、石油を燃料とした場合に排出されるガスの量は1時間に 260万立方メートル、石炭ですと 320万立方メートルにもなります。ご承知のように、石油にも石炭にも硫黄を含んでいますので、これらの燃料が燃える時に硫黄酸化物として煙突から排出されます。排出量は不純物として含まれる量によって違うのですが、1時間当たり450から4,450立方メートルになります。最近では脱硫の装置がつけられていますので、この量は1桁小さくなります。石炭では石油の大体2倍の硫黄酸化物が放出されることになります。放出された硫黄酸化物は周辺に降下しないように、なるべく遠くに広域に拡散するように煙突を高くしていますので、発電所周辺よりかえって遠く離れたところでその影響が現われることになります。

石油にしても石炭にしても、それを電力に変えるためには1400ないし1500°C、あるいはもう少し高い温度で燃やします。空气中には窒素が約80パーセント含まれていますが、これはかなり安定な物質なのですが、高い温度で加熱されると窒素酸化物に変ります。いわゆるNOxですが、かなりの量が生成されます。これも取り除く装置を付けてありますが、80パーセント程度しか取ることができません。これらの酸化物は大気中に排出され、拡散して、やがては地上に降下してきます。

それではエネルギーの使用に伴って発電所・工場・自動車などから排出される熱・硫黄酸化物・窒素酸化物は実際にどのように環境に影響を与えていくのか、まず熱の場合からお話をいたしましょう。

●ヒートアイランド

都市のように、局地的に多量のエネルギーを消費し熱を捨てますと、そこでの気温が上ります。空気が温まり対流も起るのですが、それも閉じた、あたかも島のような状態になります(図9)。この都市の高温化のために都市と郊外との気候の差が目立つようになってきました。このような高温部分はヒートアイランドすなわち熱の島と呼ばれています。

例えば図10は東京とその周辺の地上の気温分布を示します。1976年の3月7日の朝の場合です。朝の5時ですからかなり冷えまして、小金井のあたり

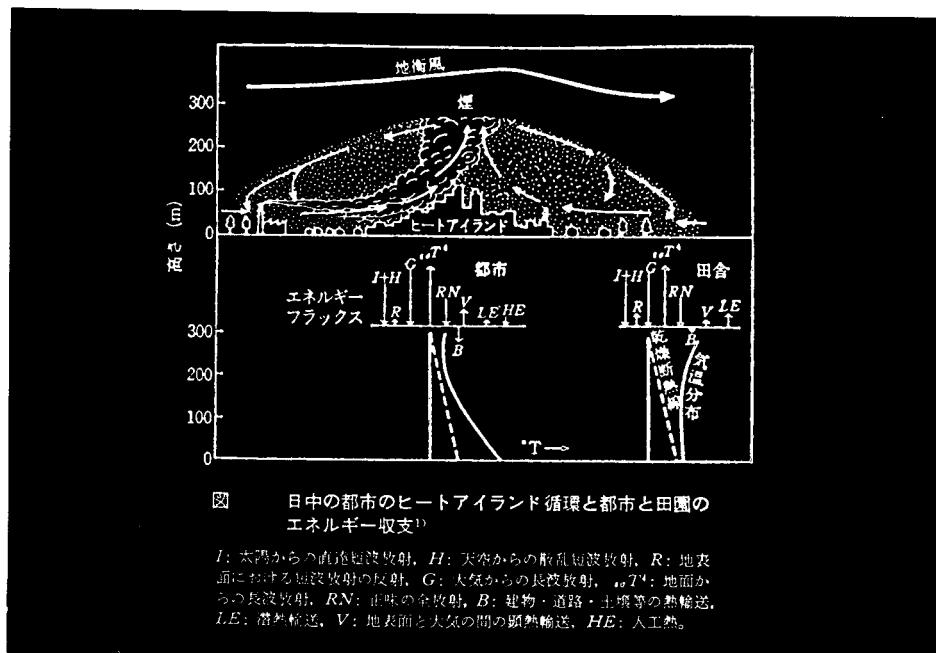


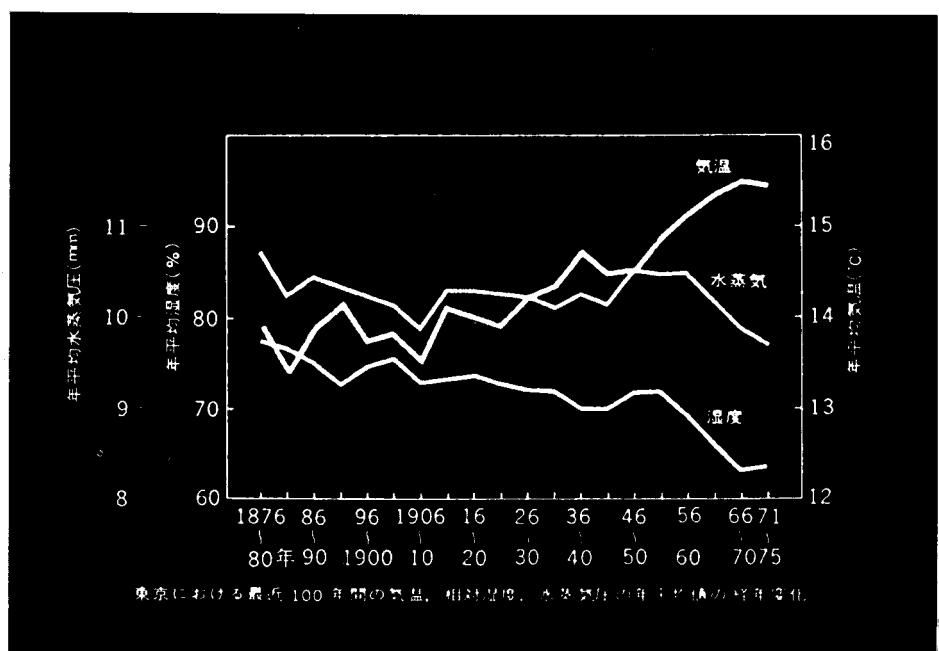
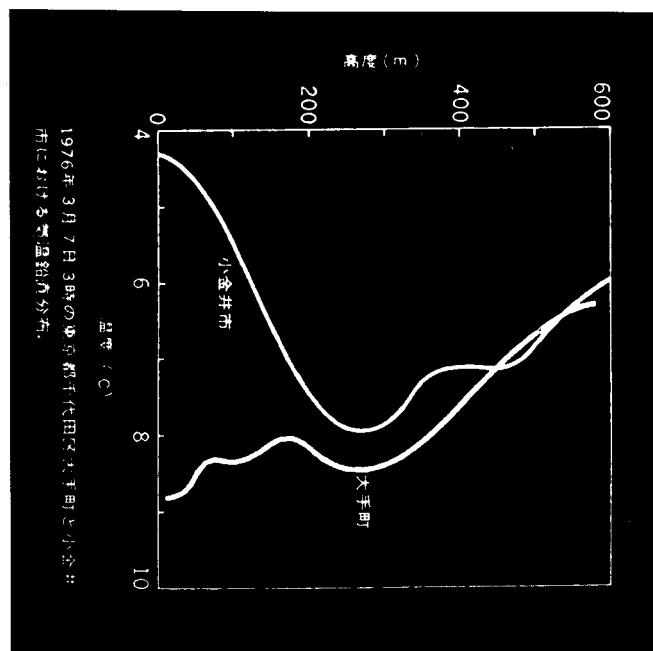
図 9



図10

では 3°C を示しますが、大手町では 7°C にもなります。それが更に京浜工業地帯の羽田周辺では 8°C 位になります。小金井との差は 5°C 、もう少し北の武蔵野との比較では 8°C も違うことになります。この様な都市と効外の気温分布の差は夜と冬に大きいことがわかっています。

地面は昼間暖まりましても、夜は地表の温度がずっと下ってきます。そこで小金井と大手町の朝 3 時の気温の状況がどうなっているかを図11に示します。小金井では地面の温度はずっと下って 4°C になっていますが、高さが増しますと次第に気温が上り、300メートル付近では 8°C 位にまでなります。それから上はまた下るという典型的な気温の変化を示します。大手町では地表



は9°Cもあります、明方でも冷えません。そのまま300メートル位の高さまで同じ温度になっています。かように郊外と都心とでは気温の状況も違つてしまっています。

これを都市化がまだ進んでいなかった100年前からの気象データを比べてみると(図12)、ジグザクの変化はしていますが、気温が次第に上ってきているのが見られます。特に第二次大戦後の変化の大きいのが特徴的です。また道路の舗装が十分に行われるようになった結果、地面からの水蒸気の供給が少なくなり、そのために空気中の水蒸気量の減少も見られます。東京の郊

外と旧市内とを比較しますと、実際の気候と都市の気候とが違ってきていることがわかります。

●炭酸ガスの増加

炭素は大気中には炭酸ガスとして、動物・植物の基本的な構成元素として、また海水中には炭酸イオンとして膨大な量が存在します。図13は炭素が地球上をどのように循環するかを年間の移動量として示してあります。単位は10億トンです。大気中には7000億トンの炭素が炭酸ガスとして存在します。陸上の植物は炭酸同化作用によって350億トンを吸収しますが、呼吸によって100億トンを放出します。結局250億トンが1年間に植物として蓄積されることになります。また1000億トンの炭素が大気と海との間で出入りしていることもあります。

これら自然の循環に比べますと、人間が化石燃料を燃やして炭酸ガスとして大気中に排出する量は僅かです。それでも年間50億トンが放出され、そのうちの約半分が確実に大気中に蓄積されています。

大気中の炭酸ガスの濃度は世界の何カ所かにおいて測定されています。特に有名なのはハワイのマウナ・ロアにおける測定です(図14)。この図は1958年からの結果でありまして、縦軸は炭酸ガスの量をppm(百万分の1)で示しています。300ppmは0.3パーセントになります。夏は植物の炭酸同化作用が盛んになりますので大気中の炭酸ガス濃度は下りますが、冬は植物の活動が鈍りますので炭酸ガスの濃度は増加します。こうした毎年の季節的変動は見られますが、それを越えて確実に炭酸ガスの濃度は増えていることがわかります。1年間に1ppmの割合で増加しています。スカンジナビア、アラスカ、

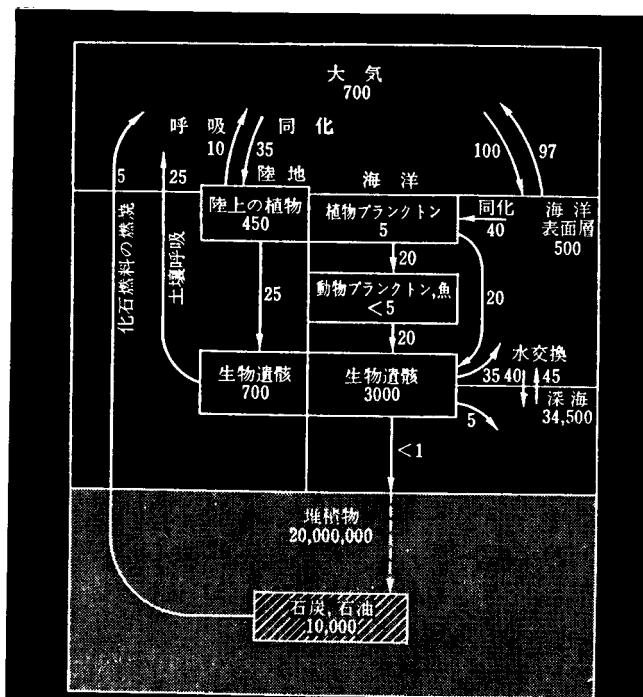


図 生物圏における炭素循環 単位は 10^{12} kg。B. Bolin,
Scientific American, September 1970, p. 130 による。

図13

南極における測定値も、ハワイの値とそれほど変りません(図15)。このまま化石燃料の消費が続きますと、約300年後には炭酸ガスの濃度は今の2倍になる筈です。

炭酸ガスの濃度が増えると地球上にどのような現象が起るのかははっきりしませんが、温室効果の起ることが指摘されています。すなわち、地球は太陽エネルギーを受けて、これを波長の長いエネルギーとして宇宙に再放射していますが、炭酸ガスの濃度が高くなつてきますと、長波長のエネルギーが炭酸ガスに吸収・蓄積され、その結果として地球が温暖化するという効果です。もし仮に地球が温たまつてきますと、南極の氷が溶け出して海面が高くなる筈です。

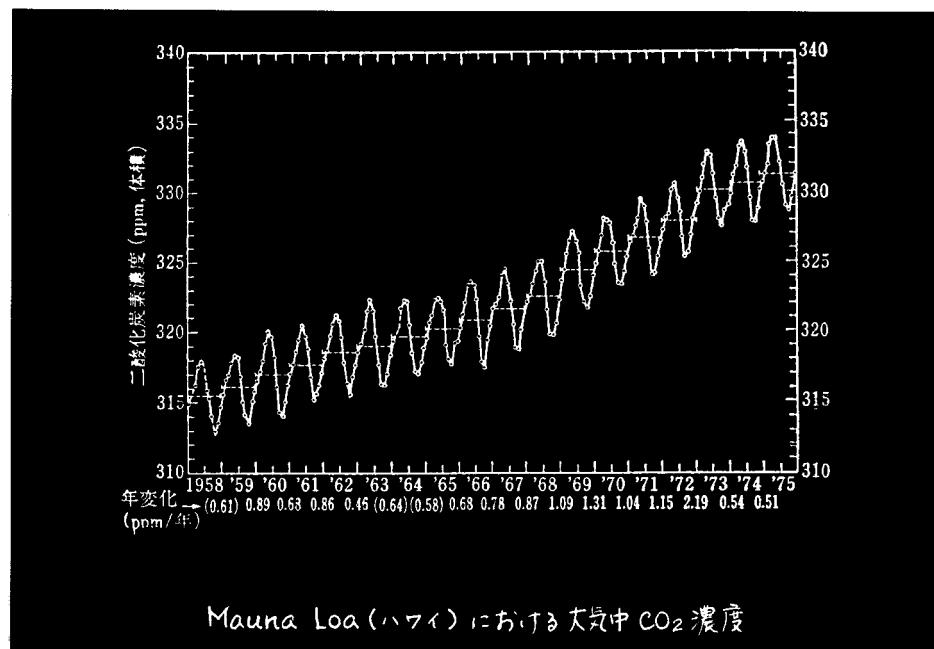


図14

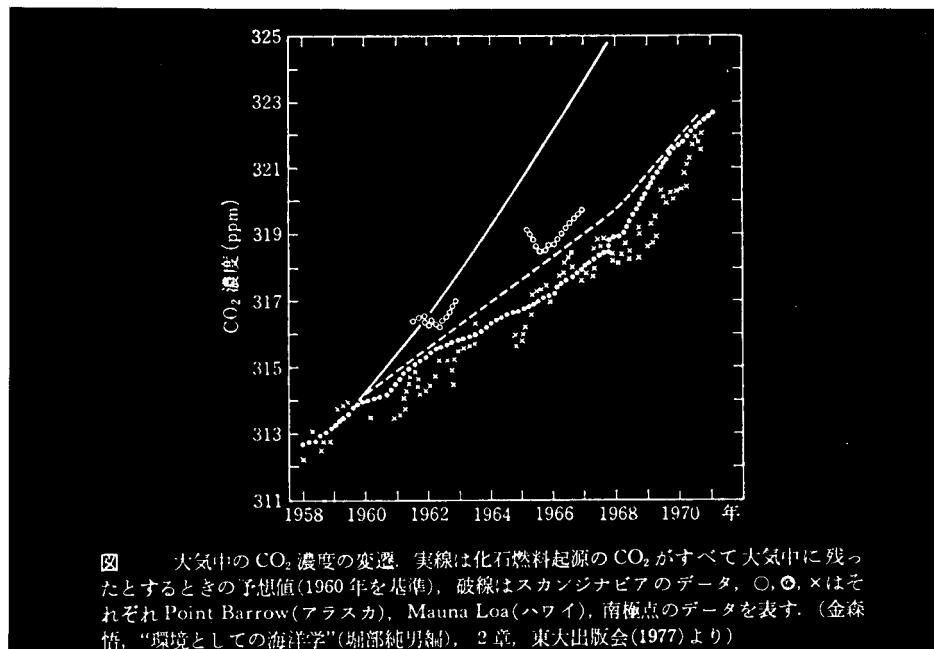


図15

なり、海に面した都市は水没の可能性があるという説もあります。ただ炭酸ガスが増加することによって植物の炭酸同化作用が盛んになり、予想するほど増えないかもしれませんので、少くともそういう効果があることを紹介いたしました。

●酸性雨

大気の構成元素としての窒素は動物・植物の重要な構成元素の1つとしての蛋白質を作りますので、本来的には環境汚染物質ではありません。

まず窒素が地球上においてどのように循環しているかを図16に示します。大気中には3兆8千億トンの窒素が存在します。植物は自ら大気の窒素を固定します。この量はかなり大きく4400万トンになります。人工的に肥料として固定化する量はほぼ天然の固定量に匹敵します。

自然界の窒素は窒素酸化物ですか、あるいはアンモニアの形で循環いたします(図17)。工場の煙突・自動車の排気ガスに含まれる窒素酸化物が公害規制の対象になっていますが、地球上での循環量を比べてみると、自然が作る窒素酸化物は年間7億6800万トンであるのに対しまして、人工的に汚染物質として放出する量は%以下の5300万トンに過ぎません。自然界での放出が、実は人間が作っているものを遙かに上回っているわけです。ですから地球全体から見ますと環境的にそれほど大きな影響を与える筈はないのですが、発電所・工場からの排煙あるいは幹線道路を走る自動車の排気ガスなどは局地的にかなりの濃度になりますので、自然界の濃度を上回ることが起ります。大気に放出された窒素酸化物は海洋にそのまま溶けるか、あるいは雨・塵として地表に降下します。雨として地表に落ちる窒素酸化物は次に述べま

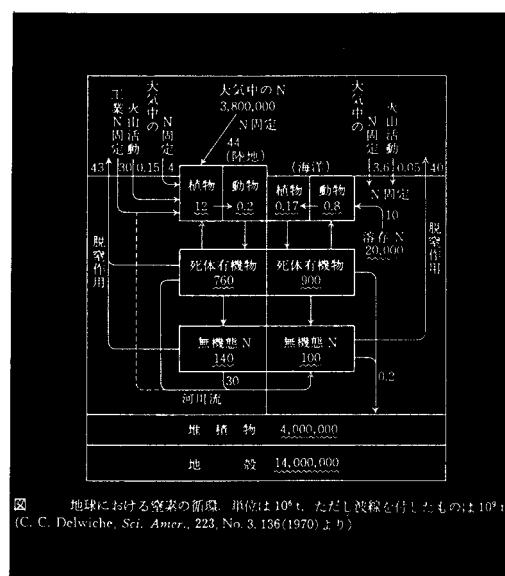


図16

す酸性雨の原因の一つになっています。

次に硫黄についてお話をいたします。地球上での硫黄の循環は図18のようになっています。硫黄の放出は陸上では自然の生物活動によるものが1億5千万トンであるのに対しまして、人間の活動によって大気中に排出される硫黄の量は自然のそれを越えた2億トンになります。これは炭素・窒素とは本質的に異なるところです。火山からの硫黄は意外に少なく、100万トン程度に過ぎません。大気中の硫黄酸化物はアエロゾルとしてそのまま降下する場合もありますし、雨に溶けて降下することもあります。これがヨーロッパ・アメリカ

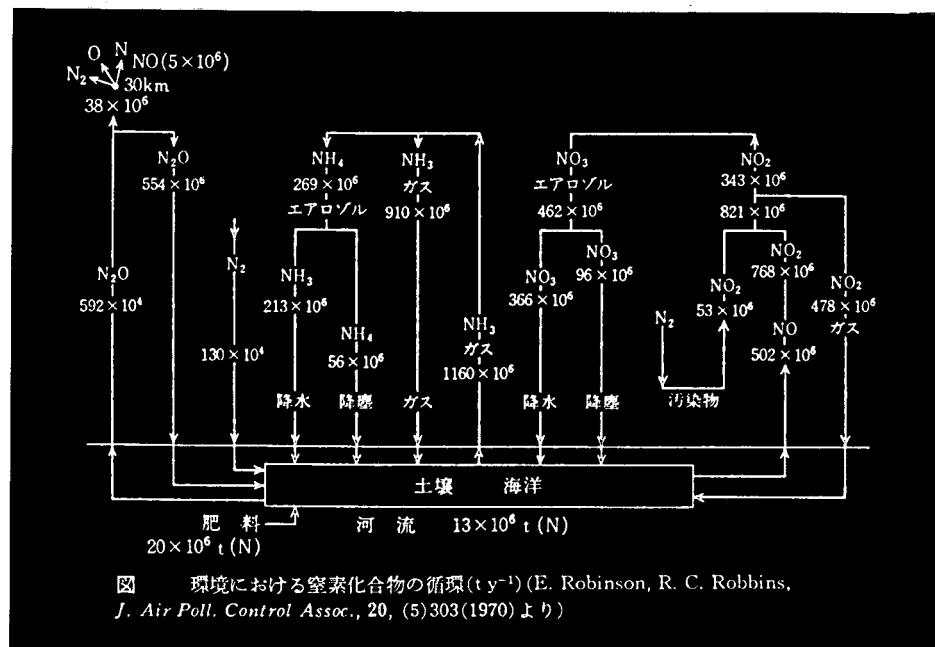


図 環境における窒素化合物の循環(t yr^{-1}) (E. Robinson, R. C. Robbins, J. Air Poll. Control Assoc., 20, (5)303(1970) より)

図17

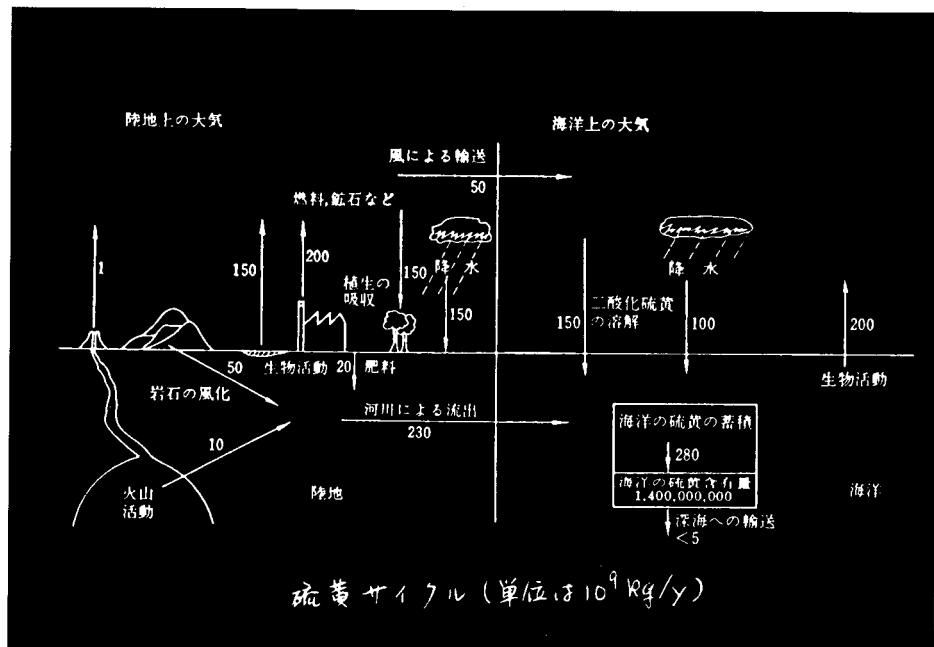


図18

リカで問題にされている酸性雨の原因になります。

アメリカ・ヨーロッパではかなり以前から酸性の雨が降るということが問題にされていました。酸性を示す化学成分を調べてみると、硫黄酸化物が主であったのですが、最近では窒素酸化物の割合が増えてきております。酸性の雨が降りますと、湖沼が酸性に変ってゆきます。ひどい場合には魚が死ぬ場合も報告されています。カナダ・北欧では森林が枯れることも報告されています。

アメリカの場合だと、硫黄酸化物の放出は五大湖周辺からニューヨークにかけての工業地帯が発生源になっています(図19)。アメリカでは夏は西南の風が、冬は北に寄った西風が卓越風になりますので、硫黄酸化物は東または北東方向に風に乗って移動します。運ばれる時の高さにもよりますが、数十キロメートルから数百キロメートルも移行・拡散しますので、工場地帯から遙かに離れたところに酸性雨が降り、森林が枯れるという現象が見られることになります。

そこで実際の雨のpHはどの位になっているのか、北アメリカについての測定値を図20に示します。pHというのは御承知の方も多いと思いますが、何も含まないただの水はpHが7、レモンとか酢ですとこのpHが7より小さくなり、酸性を示します。pHの数字が小さいほど酸性が強いことを意味します。図には等高線に数字が書いてありますが、これがpHであります。1955年から1956年のデータと1972~1973年のデータを比べてみると、この数字がずっと小さくなっています。このことからエネルギーの消費量が増えたために雨がより酸性になってきていることがわかります。またその範囲も拡大しております。酸性が強い雨の降る地域は前の図19と比べてみると硫黄の発生地域の東、ないしは北東方向に移っていることもわかります。

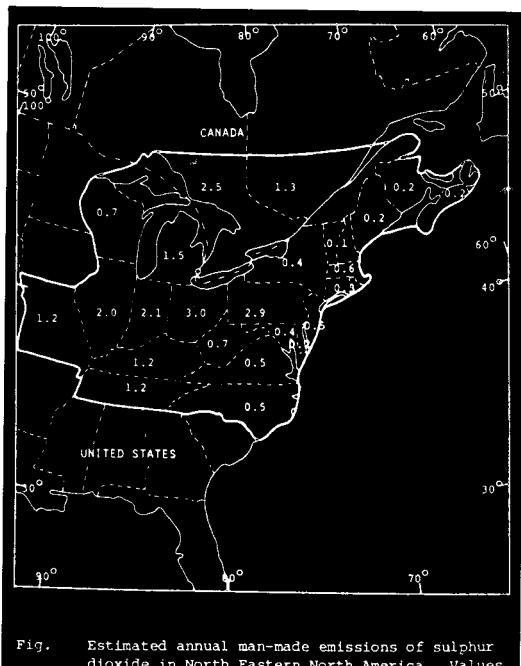


図19

北アメリカ東北部における二酸化硫黄の年間排出量(推定値)、図中の数字は10⁶トン(SO₂)／年。

ヨーロッパでの酸化硫黄の発生を調べた結果が図21であります。図では点の密度の高いところ、すなわちイギリス東部・ベルギーと西ドイツ西部周辺・東ドイツ東部・チェコとポーランドの国境周辺において硫黄酸化物の発生濃度が高くなっています。ヨーロッパでは年間を通して西ないし西南の風が吹いていますので、放出された硫黄酸化物は風に乗りましてヨーロッパの東側あるいは北側に降下します。その状況を図22に示します。

北欧の場合では1957年と1970年の2つのデータがあります(図23)。1957年の場合には最も酸性の強いところでもpHは5ぐらいでしたが、十数年間で4.5の雨の降る領域が拡がっていることがわかります。恐らく酸性雨が原因だと

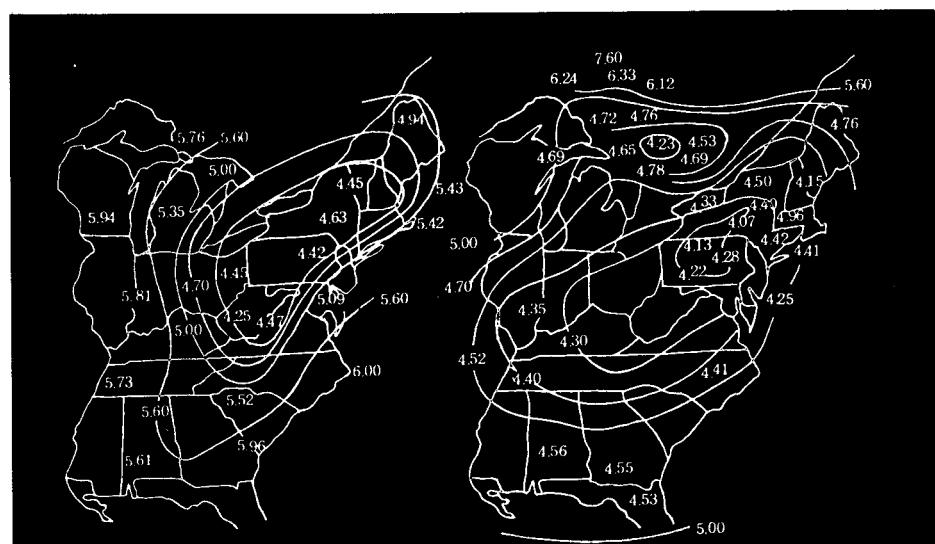


図20 北米の降水のpHの変化

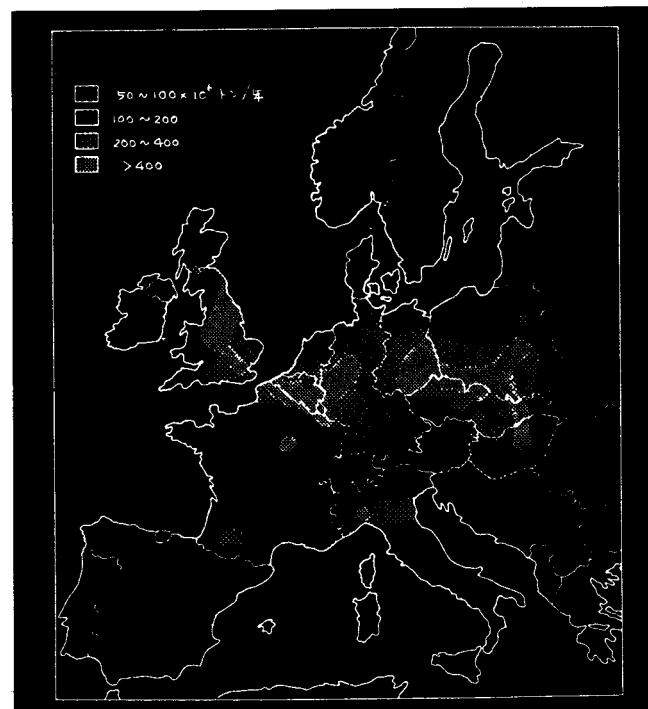


図21 ヨーロッパにおけるSO₂発生量 (1973)

1973年12月から1975年
3月までの二酸化硫黄
の降下量

1973年12月から1975年
3月までの硫酸塩の雨
としての降下量

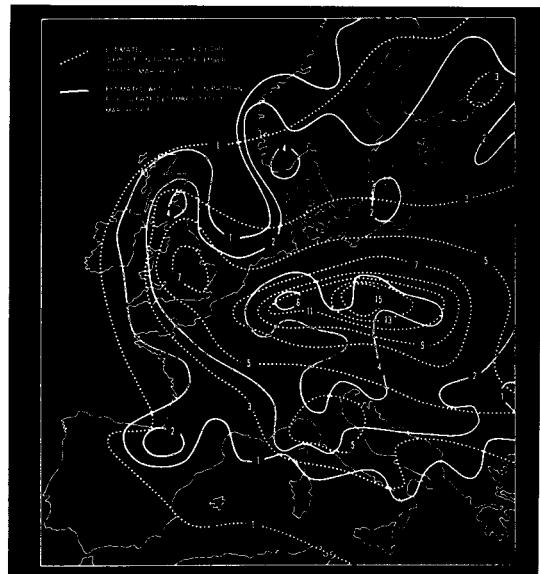


図22 ヨーロッパにおけるSO₂、
SO₄²⁻の降下(g/m²)

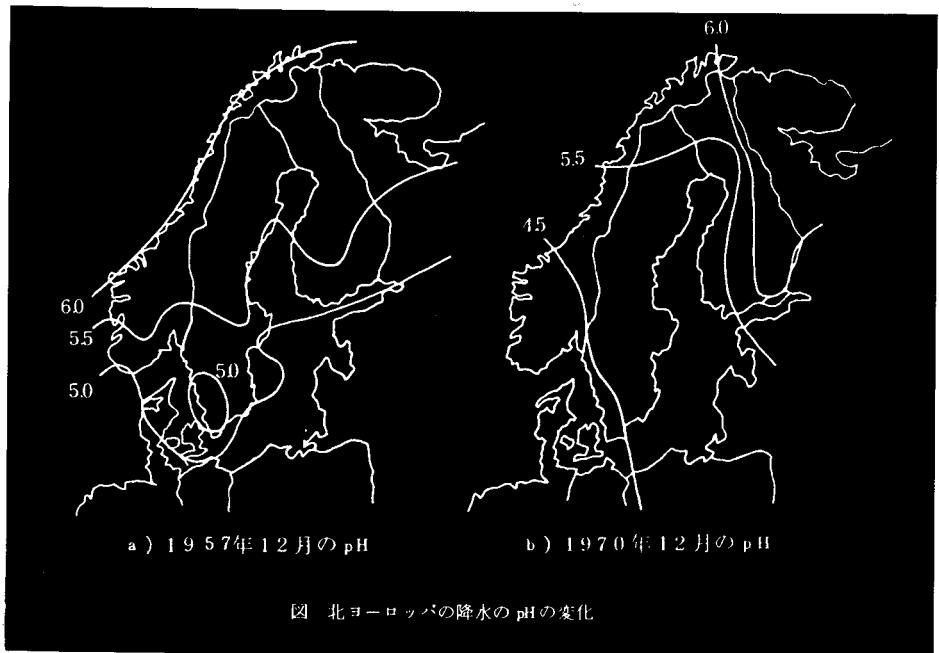


図23

思うのですが、スカンジナビア半島でも森が枯れ始めています。イギリス・ベルギー付近で発生する硫黄酸化物と窒素酸化物が雨として降るためと思われます。

● 我国の環境について

我国ではこのような測定は組織的・定常的には行われていませんので、実体がどうなっているのか、またどう変ったかということについてはわかつております。しかしながら、全くデータがないというわけでもありませんので、入手できたデータをもとにお話しをいたします。

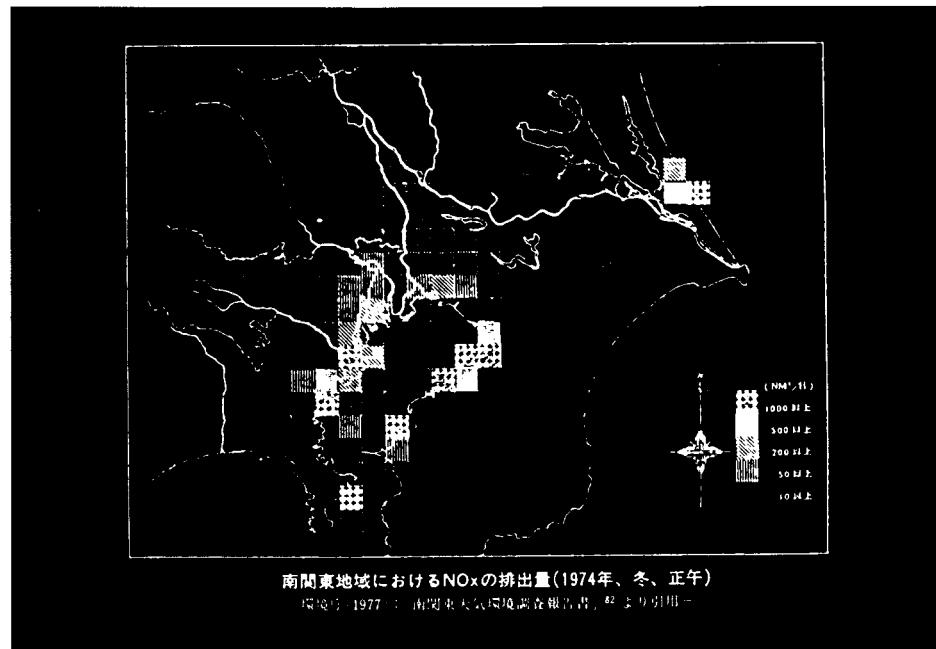


図24

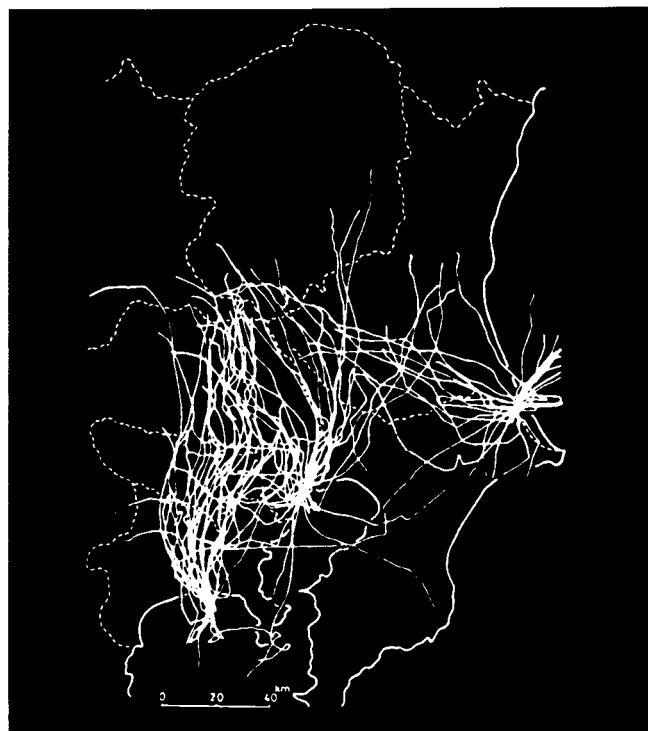


図25 流跡線の分布（6時に出発した気塊について）

南関東に関しましては、1974年の冬の昼頃の酸化窒素の排出量の調査結果があります。図24がそれです。発電所、工場、自動車が主な排出源になると思われますが、東京湾の湾岸と鹿島地区での濃度が高いことがわかります。窒素酸化物が排出されるということは、同時に硫黄酸化物も放出されていると考えて差し支えないと思います。排出された窒素酸化物がどのように移行するかは局地的な気候と密接な関係にあります。

関東地方での環境汚染物質の移行の仕方は夏の場合と冬の場合とで異なります。図25に夏の流跡線を示しますが、これが時間的にどのように変るかを

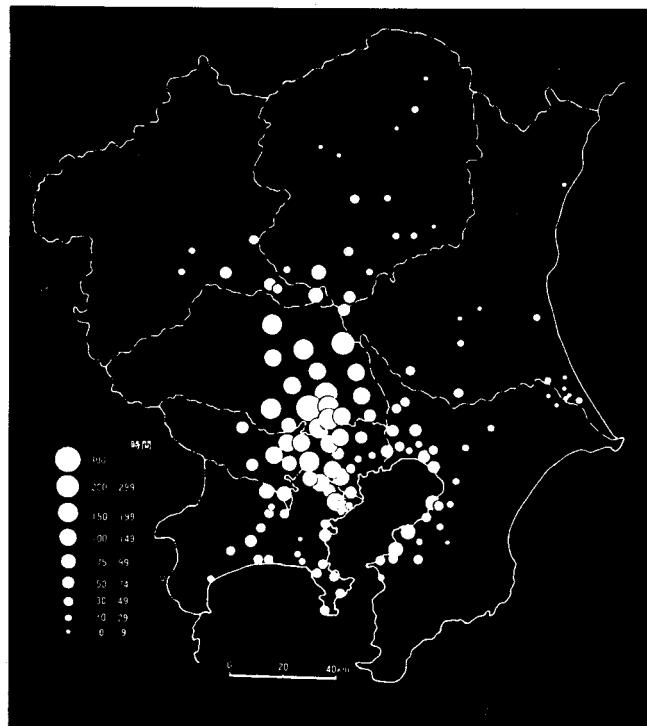


図26

関東地方のオキシダント高濃度
(0.12ppm以上)
時間数分布
(1975年4月～1978年3月)

調べてみます。まず朝早くは東京湾を北上する風が強く流れますが、しばらくして10時を過ぎて昼近くになりますと相模湾を北上する風が勝ってきます。それから更に鹿島灘からの東風が次第に強くなりまして関東地方の中央部でも東風になります。従いまして、京浜工業地帯あるいは都心から湘南地区にかけての工場・自動車などから排出される汚染物質は昼間はまず風に乗って北上し、次に中央部付近にて東風によって北西方向に移行すると考えられます。夜になると、どちらかというと北からの陸風が強くなりまして、一旦内陸に入った汚染物質は海に向って戻る傾向を示しますが、夜の風はそれほど強くはありませんので、明方になりますても東京湾上には出ません。かようなサイクルを繰り返しながら汚染物質は大気中を漂よい、次第に自然降下いたします。従いまして神奈川県から埼玉県にわたりまして、硫黄酸化物・窒素酸化物あるいは光化学反応などで生成するオキシダントの濃度は高くなることが予想されます。

図26は1975年の4月から3年間の高濃度のオキシダントが現われた時間数を地図上に示したものです。これを見ますと、図25の風の流れとよく合っていることがわかります。

冬の場合は関東地方にとっては状況はかなり良くなります(図27)。冬の季節風は地方によっては赤城おろしとか筑波おろしとか呼ばれていますが、関東地方では一般に北からの風になりますので、工業地帯からの汚染物質は海上に出てしまします。季節風の吹出しがあってしばらくしますと大陸の高気圧は移動性となり、次の吹出しがあるまでの間は平穏な日が続きます。こういう状態は12月に多く現われまして、いわゆる小春日和と呼ばれています。この時には風がほとんどありませんので、硫黄酸化物・窒素酸化物は自然の拡散によって拡がるのが主になりますが、どちらかというと発生地の近傍に

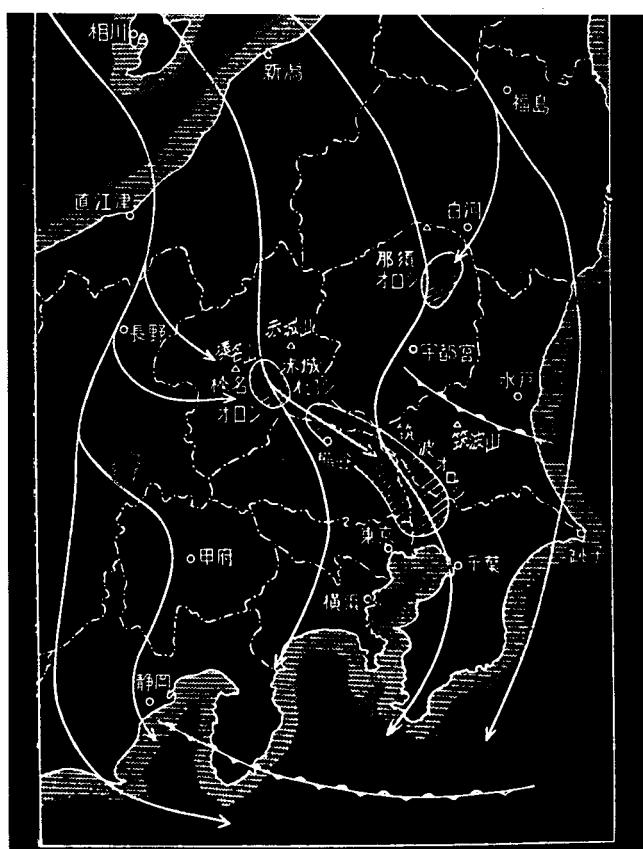


図27

- 強風域
- 流線
- 不連続線

冬の季節風（1957年1月12日15時）
のときの流線図と関東地方の強風
地域〔吉野〕

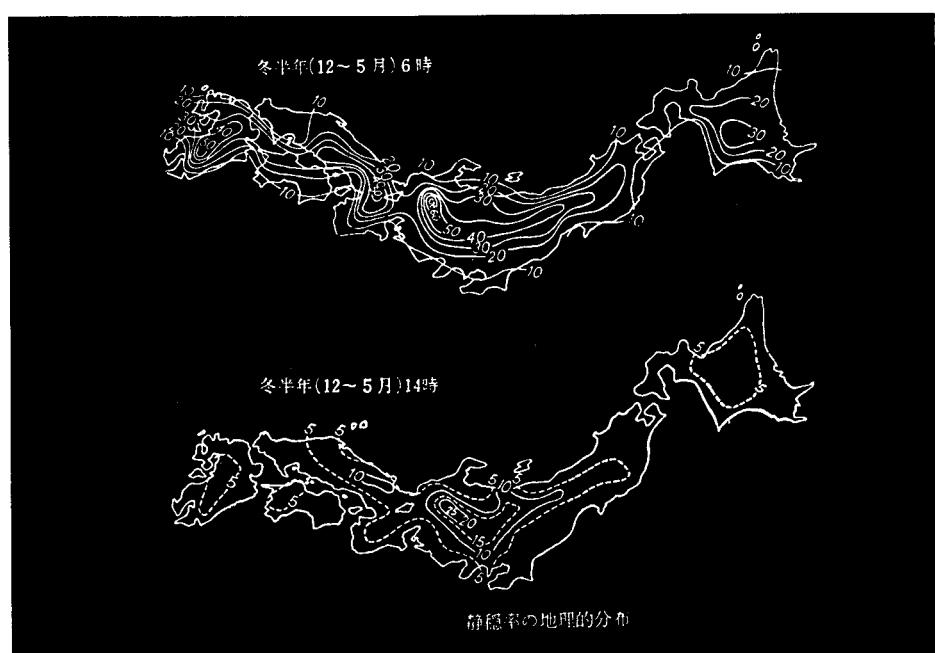


図28

漂よい、降下することになります。

我国は海に囲まれているなどの地理的条件が幸いしまして、風のない日が極めて少ないという気候条件下に置かれています。どの程度風がなく静穏なのかを調べた結果があります(図28)。風のない日あるいはあったとしても風

速の小さい日を無風日といたしまして、1年間に現われる割合を静穏率として百分率で表わしたものです。従って図中の数字が大きいほど風がないことを示します。図には冬の6時と14時の場合を示してあります。6時と22時は同じ状況にあります。また夏は冬の場合とほとんど変りません。これを見ますと、海岸は風のある日が多く、内陸ほど風のない日の割合が増えていることに気が付きます。昼の2時では日本中のどこの海岸でも静穏率は5パーセント以下ですから、ほとんど毎日風が吹いています。夜でも10パーセント以下です。従いまして、汚染物質が放出されたとしても、それが淀む割合は比較的少いことがわかります。これは我国にとりましては恵まれた気象条件にあることを示しております。

おわりに

以上、エネルギーと環境についてお話をいたしましたが、この2つは従来は極めて安価に入手できるものでした。特に環境については日本が地理的条件に恵まれていたこともあり、人間活動による廃棄物の放出は自然の浄化作用が大きいために、ほとんど問題にする必要はありませんでした。「水に流す」という表現はその辺の事情を物語るものです。しかし高度成長を遂げて工業の規模が大きくなり、自然への化学物質の放出量も増大しますと、自然の浄化作用を越えるようになりますと、自然環境は急速に悪化してしまいました。

現在、我国のエネルギー資源はそのほとんどを外国からの輸入に頼っていますし、石油に対する依存度も大きいままです。またエネルギーの単位面積当たりの使用量、いわゆるエネルギー密度も東京など一部の地域では太陽エネルギーに匹敵するほどの大きさになっています。エネルギー使用による環境の悪化はともかく止まったようですが、もっと改善できるのではないかとも思います。我国にとりましてエネルギーと環境の問題は今後とも重要な課題でありまして、その解決に国として取組む必要があるように思います。

御清聴を有難うございました。