Ⅶ　平成６年度　環境科学研究科プロジェクト報告

地球環境変化に伴う陸上生態系の炭素・水循環過程の解析

(代表)及 川 武 久
寺 島 一 郎
東 照 雄
田 瀬 則 雄

はじめに

大気中の二酸化炭素濃度上昇を主因とした地球温暖化が地球規模で進行中である。このような環境変化は陸上生態系の生理・生態特性にも大きな影響を及ぼし，その結果，陸上生態系に大規模な変動が生じるであろう。さらに，この生態系の応答過程を通じて，陸上生態系の変動は大気環境へもフィードバックするものとみられている。このような地球環境と陸上生態系との間の生物地球化学的循環系の最も重要な構成要素である炭素と水に焦点を当てて，次の４つのテーマを定めて研究を行った。

1）草原における炭素・水フラックスの解析
2）光合成・呼吸過程の解析
3）森林における分解過程の解析
4）森林における水循環過程の解析

成果概要

1）草原における炭素・水フラックスの解析

調査地である筑波大学水理実験センター内にある直径約160mの円形の草原で認められた植物は合計31種(そのうちイネ科は11種)で，C_3植物は23種，C_4植物はすべてイネ科で，８種を数えた。1994年の４月～６月にかけてはイネ科の寒地型牧草であるヒロハウシノケグサ(*Festuca elatior*)をはじめとするC_3植物が急速に成長し，気温が特に高かった夏から秋にかけてはC_4植物のメリケンカルカヤ(*Andropogon virginicus*)やチガヤ(*Imperata cylindrica*)の現存量が急激に増加して，C_3植物が優占する草原からC_4植物が優占する草原へと季節的な遷移を示した。

このような草原を対象として，群落上の二酸化炭素フラックスを測定すると同時に，C_3植物とC_4植物の光合成・気孔応答の違いを組み入れた群落の多層キャノピーモデルを作成した。この多層モデルを用いて地球環境変化に対するC_3植物群落とC_4植物群落の応答の違いを評価した。

個々の葉の気孔抵抗は，光合成有効放射の関数とし，個葉の純光合成速度Phを個葉に隣接する大気の二酸化炭素濃度(Ca)，二酸化炭素補償点(Γ)，二酸化炭素の拡散に対する葉面境界層抵抗，気孔抵抗，葉肉抵抗(r_M)の関数として定式化した。r_Mは光化学反応速度(光合成有効放射の関数)と，二酸化炭素固定反応速度(葉温の関数)に依存する。ここで，C_3植物についてはΓを葉温の関数とし，C_4植物については光呼吸がないと考えて$\Gamma=0$としている。

モデル計算の結果は，気温が最も高い８月にはC_4植物群落，気温が下がった10月にはC_3植物群落としての計算値が実測値に近く，９月には両者の中間にあった。

次に，それぞれC_3植物のみとC_4植物のみから成る２種類のモデル群落を設定して，それぞれの群落光合成の，日射量と気温に対する依存性を比較した。モデル計算の結果，C_3植物群落の場合，日射量が少ないと，気温変化に対する群落光合成の変化は小さいが，日射量が多いと，気温上昇に伴って葉温も上昇するために呼吸が促進されて，群落光合成は急激に減少する。一方，C_4植物群落の場合，日射量が多くても，気温上昇に対する群落光合成の低下は小さい。例えば，気温30℃の高温条件下でも，日射の増加に伴って群落光合成は増加するものと予測された。

来年度は，二酸化炭素濃度上昇による地球温暖化と大気の施肥効果といった大きな地球環境変化に対応して，草原生態系がどのように応答するかを，二酸化炭素フラックスに基づいた草原の成長，水利用効率の変化，さらにはC_3植物とC_4植物の優占度の変化などの面から予測する予定である。

2) 光合成・呼吸過程の解析

地球環境変化にともなう陸上高等植物の光合成・呼吸に関しては，現在までに様々な研究がなされている。しかし，多くの研究は，温度や二酸化炭素濃度が高い状態で植物を栽培して，その光合成や呼吸速度の変化を対照植物と比較するという現象の記載の段階にとどまっている。

これらのデータは，温度や二酸化炭素以外の条件によって，一般に大きく異なる。しかし，データを詳細に解析すると，ソースとシンクのバランスの問題の重要性がクローズアップされる。これは植物生理生態学の分野で長い間研究されてきた問題で，光合成生産によって貯えられたエネルギーが植物体の成長や生体維持によってどの様に使われるかというバランスの問題である。この関係の種による違いおよび環境による違いが，データの多様性を説明するように見える。

このような観点から，本研究では，葉の呼吸に焦点を絞って，「エネルギーの消費」という面でソースーシンク関係における最も重要な過程でありながら生理生態学的な研究がまだ少なく，殆どブラックボックスとして扱われてきた「呼吸速度の制御要因」に関する基礎研究に着手した。

(材料と方法)陰生植物は暗い光環境下で呼吸速度を低く抑えている。このことは，陰生植物が暗い光環境下において正の生産を行い，生命を維持するために極めて重要な性質である。そこで，本研究では鉢植えの陽生植物ホウレンソウ(アカザ科)と陰生植物クワズイモ(サトイモ科)を，様々な光条件下で，恒温室内，明暗周期下で栽培し，葉の呼吸の様々な側面に関して比較検討した。生葉の呼吸速度は，二酸化炭素ガス交換法によって，暗期開始直後から夜間を通して測定した。また，生葉抽出液中の呼吸関連酵素の活性および各種糖類濃度を測定した。

(結果)陽生植物ホウレンソウの暗期の呼吸活性は，明期終了直後最も高く暗期を通じて減少した。一方，陰生植物のクワズイモの暗期の呼吸速度は一定であった。暗期の終わりの呼吸速度(乾燥重量あたり)は，栽培光強度が低いほど低く，同じ栽培光強度下で栽培した植物間では，クワズイモの呼吸速度のほうがホウレンソウよりも顕著に低かった。

暗期におけるホウレンソウの呼吸速度の減少は，糖類濃度の減少を伴っており，呼吸速度と糖類

濃度とは強い相関を示した。ところが，クワズイモの呼吸速度は糖類濃度とは無関係であった。4種の呼吸関連酵素の活性は，生葉重量当たりに換算すると，種や栽培条件によらずほぼ一定の値を示した。また，乾燥重量あたりのホウレンソウの蛋白質含量は，クワズイモよりも顕著に高かった。(考察)これらの結果から，ホウレンソウとクワズイモでは，呼吸を律速する要因が異なっていることは明らかである。ホウレンソウ葉の呼吸速度は，糖の濃度に強く依存していることから，呼吸基質のレベルによって律速されている可能性が最も高い。一方，クワズイモでは，呼吸速度は基質濃度と無関係である。クワズイモの葉では，蛋白質含量が少なく，蛋白質のターンオーバーをはじめとする生体維持のエネルギー要求量が低く抑えられている可能性がある。このことが，暗い環境での生活を保障しているのであろう。

このように，生物の基本的な生理学的プロセスである呼吸を例にとっても，その制御は種によって異なり，そのことが植物のシンクーソース関係，ひいては二酸化炭素濃度や気温の上昇に対する植物の応答を多様にしている。今後は，さらに呼吸の制御と植物のエネルギー代謝の関係を究明し，エネルギー生産ー消費系として植物を捕らえなおしていきたい。一見，回り道のように見えても，このような基礎研究が，地球環境変化に対する植物の応答をメカニスティックに理解する上で，大きな貢献をすることは間違いない。

3) 森林における分解過程の解析

温室効果ガス，とくに二酸化炭素の濃度上昇にもともなう近未来的温度上昇によって土壌温度環境も大きく変化することが予測され，土壌からのCO_2フラックスと土壌炭素の動態に関するより定量的な把握が求められている。これまで，土壌表面からのCO_2フラックスは様々な方法で測定されてきたが，通気法による信頼性の高いデータが蓄積されつつある。しかしながら，装置電源などの制約から研究目的とする全てのフィールドで測定できないのが現状である。そこで，本研究科プロジェクトでは，初年度にあたり不撹乱土壌($50cm^2$ x 20cm=1Lコアサンプラー)を最大6個まで収蔵できる大容量の温度制御型チャンバー(ヤマト科学恒温試験器CT Chamber IV21，容量約30L)を組み込んだ通気法によるCO_2フラックス測定装置を開発し，CO_2フラックスの温度依存性を明らかにすることを試みた。

図1に示すような装置を最終的に開発した。装置は，外気とチャンバー内を通過した空気のCO_2濃度差を測定するものであり，チャンバーの機密性，外気の水分除去にはとくに配慮した。チャンバー内に6Lのコアサンプラーを収蔵した場合，約1時間で完全にガス交換が可能であった。また，各設定温度で，約16時間試料をチャンバー内に静置することで試料温度はその設定温度と平衡に達した。ここでは，10，20および30℃でフラックスの測定を行ったが，水分の土壌表面からの蒸発を防ぐためにラップをして温度平衡にさせた後，ラップをとり約1ないし2時間の通気測定を行い，約10分間の一定濃度をもって測定値とした。通気量は入口で4.0L，出口で3.5Lとした。

上記の測定条件で植生を異にする黒ボク土の土壌不撹乱試料(土壌深；O層表面から20cm)についての測定例を図2に示した。ここでは，O層の有無についても同時に示した。別に求めたO層の

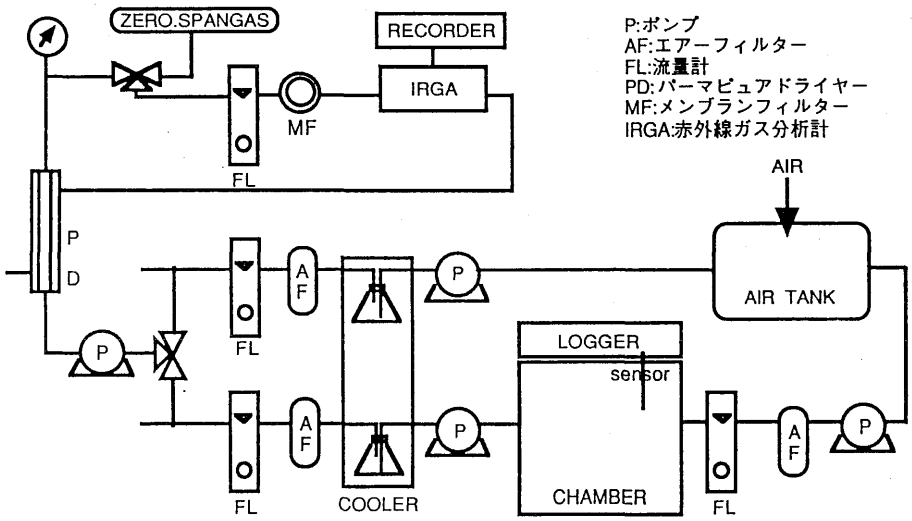

図1　CO_2フラックス測定装置概略図

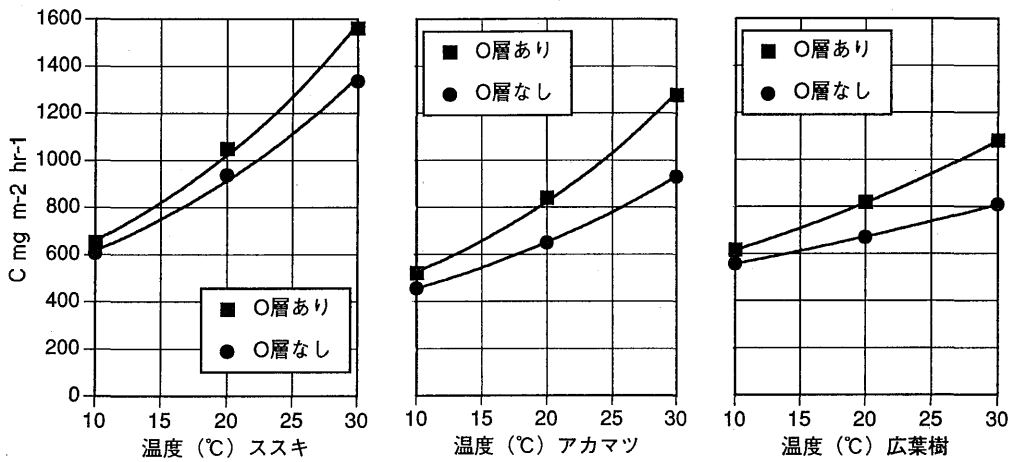

図2　植生を異にする黒ボク土表面からのCO_2フラックスと温度依性

$1m^2$当たりの現存量と本研究で得られたO層のみ(図2の差からのCO_2フラックス)から炭素の平均滞留時間を求めたところ(10℃)，ススキ草原では約270日，アカマツと広葉樹では，それぞれ，540日と470日になり，既存のデータと比較的よい一致を示した。このことは，開発した装置が信頼できるものであり，今後，我が国におけるより広域の地理的空間のなかで植生－土壌の種々の組み合わせを変えて研究できる可能性を示すと考えた。

4) 森林における水循環過程の解析

森林における水循環過程については，すでに多くの研究があり，かなりのことが理解されてきている。しかし，森林と言ってもその背後にある地形・地質，水文条件などは様々であり，地球環境変化に対する応答も複雑であることが予想される。

今回は，土浦市の宍塚大池地区の林地，芝地，谷地(笹地)の３ヶ所において，土壌水分量の測定を開始し，それらの変動の差異を明らかにすることを試みている。特に，谷地である荒れ地は湿地的環境下にあり，そこでの水分の挙動については未知の点が多い。本調査では，谷地部に埋設型のテンシオメータを設置し，降雨への応答，蒸発散との関係を明らかにすることを第一の目的とした。

測定機器の設置が終了したのが年末近くになり，蒸発散との関係は来年度の観測によるが，降雨への応答についてはいくつかのイベントを記録することができた。

埋設型のテンシオメータ(サンケイ理化製)を深度60cm，80cm，120cm，160cmに埋設し，Uロガーにより30分間隔で自記記録した。このセンサーの特徴は負圧(テンション)だけでなく正圧(地下水位)も測定できることである。また，深度2.6ｍの観測井を設置した。

図３に観測結果の一部を時間降水量とともに示した。図をみると，降雨に対し，浅い深度のものが早く鋭く反応しているのが読みとれる。12月26～27日の降雨は10.5mmであったが，大きな応答は60cm深でみられるが，それ以深では非常に緩やかでピークは５日後になっている。これは先行降雨条件によるものと考えられる。

１月４日の降雨は午前７時過ぎから始まり，16時までに17.5mmを記録した。図からみると応答

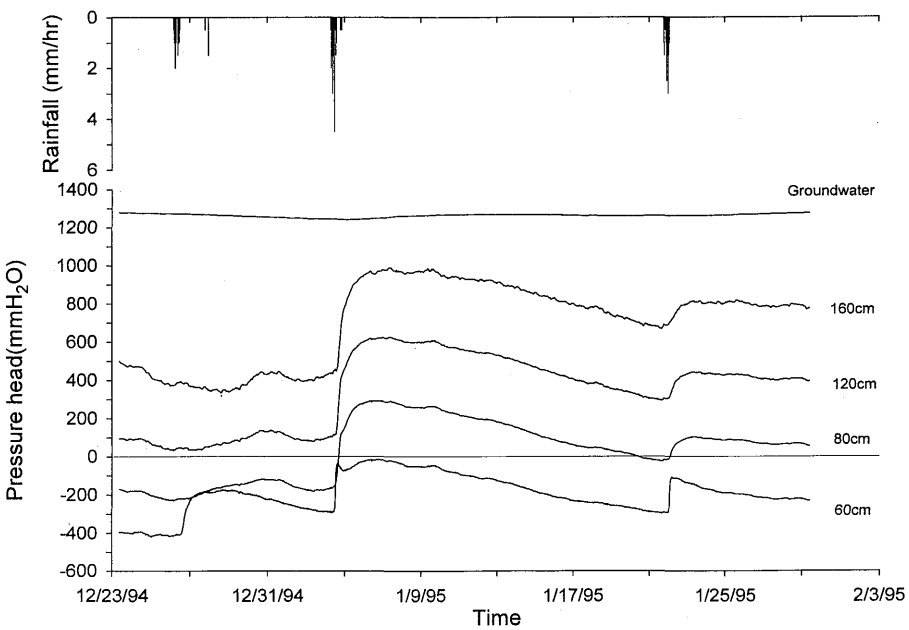

図３　降水量，地下水位と圧力水頭の変化

はかなり早いようであるが，詳細にみると降雨に対しての応答の遅れは，深度60cmで降雨開始から５時間，深度160cmで８時間ほどとなっている。さらに地下水は１日遅れで水位の上昇を始めているが，変動は小さい。また，１月22日には正午過ぎから９時間で13.5mmの降雨が記録された。降雨量，降雨強度とも１月４日の降雨より低いため，応答までの時間は60cmで７時間ほどで，鋭く立ち上がっている。このように浅層の変動が激しいが，全体として，応答は飽和，不飽和にかかわらず，浅層から深層までほぼ対応しているとみられる。また，深層の圧力水頭に周期の短い変動がみられるが，これがセンサーの特性なのか，水文学的な特性なのかは，今後の観測を待たなければならない。来年度は蒸発散に伴う変動をとらえ解析したいと考えている。

これらの研究の多くは環境科学研究科の修士論文として取り組んでいるものであり，近い将来，これらの成果をふまえて環境科学特講として紹介する準備を進めている。

尚，これらの研究を行うに当たり，三枝信子博士(生物科学系・助手)と野口航君(東京大学・理学系研究科・大学院生)の協力を得た。記して感謝する。

紫外線環境下における有機硫黄化合物の反応

(代表)西　尾　建　彦
島　田　秋　彦

天然物，あるいは生体物質の中には数多くの硫黄原子を含んだ有機化合物の存在が知られている。また，カルボニル化合物やアミド化合物は酸性条件下で，硫化水素と反応して容易に硫黄化合物，即ちチオカルボニル，及びチオアミド化合物に変化する。一方有機硫黄化合物は紫外線，または酸素の存在下における光反応によって分解し単体イオウや不快臭，あるいは大気汚染の原因となる分解物質を与える(Fig. 1)。本研究では比較的安定な環状チオアミド化合物の光化学的挙動を調べ類似構造を持つ医，農薬品の光分解代謝との関連性，及び環境への影響を解明しようとするものである。

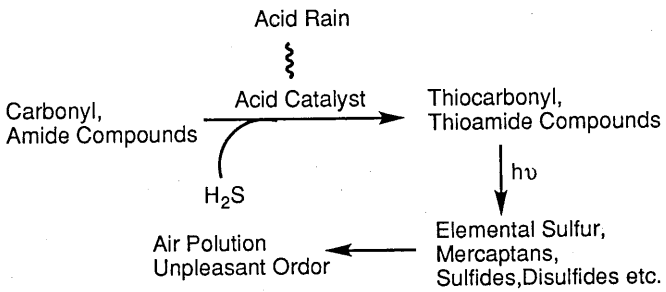

Fig. 1

チオカルボニル化合物(1)はアルケン(3)と容易に[2＋2]光環化付加反応をしチエタン(4)，あるいはさらに反応が進行した生成物を与えることは良く知られている。一方，チオカルボニル基の隣接位に窒素原子の入ったチオアミド化合物(2)とアルケン(3)の光反応においても[2＋2]環化付加反応によってアミノチエタン(5)が生成すると考えられるが，アミノチエタンは一般に不安定で容易に環開烈が起こる。これは隣接する窒素原子の孤立電子対の関与によるものとして説明することができる(Fig. 2)。

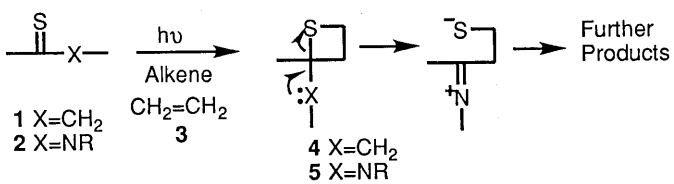

Fig. 2

例えば，ベンゾオキサゾールー２ーチオン(６ａ－ｂ)をベンゼンなどの有機溶媒中，光照射しても何の変化も起こらず原料を回収するのみであるが，Ｎ－無置換ベンゾオキサゾールー２ーチオン(６ａ)をイソブテンやアクリロニトリル等の様なアルケン(３)の存在下，光照射すると［２＋２］環化付加反応により得られるチエタンの開裂によって生成すると考えられる２－メルカプトアルキルベンゾオキサゾール(７)が得られた。また，Ｎ－アルキルベンゾオキサゾールー２ーチオン(６ｂ)とアルケンの光反応では［２＋２］環化付加反応により生成するチエタン環の開裂，さらに水の付加，オキサゾール環の開烈によって生成するフェノール誘導体(８)が得られた(Fig.３)。ベンゾオキサゾールー２ーチオン(６)とアルケン(３)の光反応による生成物，７，８は安定でさらに光照射しても分解は認められなかった。

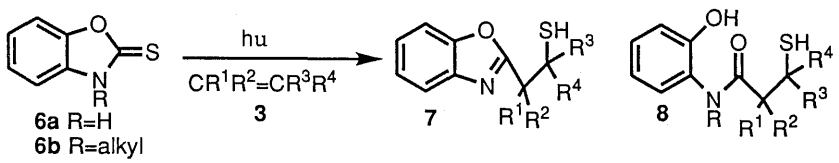

Fig. 3

以上の結果よりベンゾオキサゾールー２ーチオン(６)の様なチオアミド化合物はそれ自身は紫外線による分解などは認められないが，アルケンの様な反応物質が存在する場合紫外線によって容易に変化することが明らかになった。従って，チオアミド結合を持つ化合物の使用，保存には光を遮るなど注意する必要があることを示唆している。これらの結果を踏まえて，環境化学物質の自然界における分解と反応，及び化学物質の取り扱いについて化学反応環境論の授業の中でトピックスとして講義する予定である。

環境放射線理解のための視覚化(その2)

(代表)関　　李紀
松本　　宏

はじめに

チェルノブイリ原発事故によって放射能が環境中に放出されたことが知らされたとき，一般の人々は日本で産出される牛乳を飲むことすら死につながるかのような反応を示した。広島，長崎，そして第5福竜丸と3度の被ばくを経験している日本人としては無理からぬことであるが，どこまでが安全でどこまでが危険か知らないでいると，必要以上のパニックに陥る危険性がないとはいえない。環境問題は多くの要素・要因を含むので，未だに解明されないことも多い。しかし，少なくともここまではわかっているということについては，きちんと知らせる必要がある。このような意図で，環境放射線を学生が理解できる方法を検討していくのが本プロジェクトの目的である。

環境放射線の種類

放射線は特に電離放射線ともいって，マイクロ波や超音波などと区別して空気等のその通過する物質を電離する能力を持つものの総称である。紫外線も電離能力を持つが，普通電離放射線と言わない。また，電離放射線は人体に害があるといわれるが，最近では高周波や磁場などの非電離放射線についても人体への影響が研究されるようになっており，こちらも影響を否定しきれないようである。しかし，ここでは電離放射線だけにかぎる。

種類別に分類すると，ヘリウムの原子核であるα線，電子であるβ線，光や電磁波の一種であるγ線の他に，電荷を持つ粒子や中性の粒子がエネルギーを持って飛び交っていることになる。放射線の発生源で分類すると，空から来るもの，大地から来るもの，空気中にあるものがあり，その他，動・植物もふくめて環境に存在する全ては，もともと放射性の元素を含んでいるといってもいいほどである。そして，その放射線をだすものを分類すると，(1)宇宙の年令と同じくらい半減期が長いもので，元素が出来たときから地球上にある放射性元素，(2)そうした半減期の長い放射性元素が放射線を出して別の元素に次々と変わり，短い半減期の放射性元素となったもの，(3)はるか宇宙からやってきたエネルギーの高い粒子,(4)その宇宙線と大気中のアルゴンや窒素との反応によって大気中でできた放射性元素などで，半減期で分類すると地球の年令と同じ程度のウラン，3倍位のトリウム，その50万倍もの長さの半減期を持つ元素もあれば，空気中には4日の半減期のラドンがあり，その子供，孫の元素には1000分の1秒の半減期の元素もある。大きさは電子よりずっと小さい粒子から，宇宙からやってくる放射線には光と同じくらいの速さの鉄(鉄の塊でないので，目に見えない)すらある。

このように，放射線は，光のような電磁波か，高いエネルギーの粒子である。しかし，電磁波は可視光線より波長が短いので，目に見えないし，粒子であっても非常に小さく数が少ないので，目で見ることはもちろん出来ない。人間の感覚には視覚，聴覚，臭覚，味覚，触覚のいわゆる五官が

あるといわれるが，微弱な放射線は五官で感知することはできない。そのため，放射線についての迷信や誤解は非常に多い。たとえば，じかに放射性核種をさわることなどないトレーサー実験で，「おでこが熱いんです」といってくる学生がいたりすることがある。放射線も，たしかに物質に熱量をあたえるが，そこにある全ての放射性核種をおでこにつけても，5×10^{-14}calの熱量しか放出しない。こうした経験が放射線を完全に理解してもらうことの困難さを痛感させることになる。某国立大学の教授がレントゲン写真を撮ってもらうのに，前の人が済んでもX線が残っているからすぐに照射室に入らないと言ったとか，かなり教育のある人や，実際放射線を日頃使用している人にもこういった誤解があることに驚くことがある。また大気圏内の核爆発実験が行われていた頃には雨に当ると髪が抜けるとよくいわれたものである。1960年に発効した核拡散防止条約によって，世界のほとんどの地域で大気圏内の核爆発実験が行われなくなってからその様な言葉は聞かれなくなった。しかし，1986年に起こったチェルノブイリ原子炉の事故でまたその様な言葉を耳にすることになった。髪の毛が一時的に抜けるような被ばく線量は5Sv以上で，通常私たちが受けている自然放射線は1時間当り0.3μSv程度ですから，その1000万倍もの線量ということになる。日本では，原子力施設のある都道府県だけでなく，多くの地方自治体に環境放射線および環境放射能のモニタリングが行われているので，どこかで異常がおこればすぐにわかるようになっている。しかし，一度も環境放射線をはかったことがなく，身近に感じたことがないと，こうした誤解は一掃されないであろう。

放射線をはかる一般的な方法

物質中を高速で粒子が通過するとき，周囲の原子や分子にエネルギーがあたえられ，電子をはぎとったり，励起された状態にしたりする。それで，1)二次的に出る光や電子を測定器で検出するか，2)残された原子や分子の励起状態が放出する熱や光を検出するのが，おもな放射線測定器の原理である。

今日では，誰でも「原子は中心に原子核があって，まわりを電子がまわっている」と知っているが，ラザフォードがこの模型を考え出す直接の原因になった実験は金箔にα線を当てて反射するα線の方向の分布をはかったものであった。この実験に用いられたのは，硫化亜鉛の結晶にα線が入ると光ることを利用したものであった。暗くした実験室の中で，この光を1個また1個と数えた，その実験から今日の原子の描像ができあがったのであったといわれている。これも視覚化の一つといえるが，教育用に使うことはできなかった。

たとえば，一般の人が放射線をはかろうという場合には，当然環境レベルの放射線であろうから，非常に微弱である。たとえば，身近にある岩石のなかではもっとも放射能の多いとされている花崗岩を例にとってみる。花崗岩にはカリウムがおよそ4%ふくまれており，そのカリウムの0.01%は12億年の半減期の^{40}Kである。100gの花崗岩では1秒間に120個の^{40}Kが壊変して，^{40}Caまたは^{40}Aになり，その内の11%が1.5MeVのγ線を出す。だから，1秒間に13個のγ線がでることになる。普通に用いられるγ線用の検出器は1%位の計数効率であるから，この13個のγ線が全部検出器に入ったとしても，10秒に1個の信号が検出されるにすぎない。この信号を音に変えて，1個放射線が

入るとピッとなるようにした測定器もあり，昨年度講義の時に借用した「はかるくん」もその一つである。(科学技術庁が放射線計測協会に委託して一般に貸出しているものである)

放射線を視覚化するには，いくつかの方法があり，いずれも放射線の通過した痕跡を拡大してしたもので，写真作用を利用したもの，電離作用を利用したものなどがある。本プロジェクトで学生の教育に使用した結果について次に示す。

1)オートラジオグラフィー

放射線の視覚化の具体的方策の一つに，その写真作用を利用したオートラジオグラフィーがある。オートラジオグラフィーとは，写真乳材を塗布した感光材を放射線源を含む試料と密着させ，しばらく放置(露出)させた後，現像することにより，試料内における放射線の分布を可視的にとらえる技術である。

オートラジオグラフィーには放射線の分布を見る視野のレベルでいくつかの種類があるが，ここでは肉眼レベルで生物個体内の分布と経時的変化を調べるマクロオートラジオグラフィーを用いた。材料としては主に植物体を用い，光合成産物である糖を放射性同位体標識したものの体内転流や，植物の必須栄養元素であるリンの根からの吸収・移動性を調べるためのオートラジオグラムをX線フィルムを用いて作成した。一方で，核爆発の結果として生成される核分裂核種の植物体内挙動を調べたオートラジオグラムも入手した。

これらのオートラジオグラムは，授業においてそれぞれの物質の移動や蓄積性のみならず，放射線の性質とその核種間における違い等を理解させるための材料として活用した。

2)高温拡散霧箱

放射線を視覚化するものにウイルソンによって開発された霧箱がある。断熱膨張型のいわゆるウイルソン霧箱では，霧滴の発生に必要な過飽和状態を断熱膨張で作るので，その状態を持続することが困難である。本研究に使用した霧箱は，温度勾配によって過飽和状態を作るので，長時間持続して測定することが出来る。環境放射能論の講義では，本プロジェクトで購入した島津製作所製の高温拡散型霧箱(WH-20)を使用した。エチレングリコールを封入した拡散槽の上部をおよそ200℃に加熱し，下部を強制空冷することによって，約60℃の温度勾配をつける。この温度勾配で，槽のなかにエチレングリコールの過飽和層ができ，その拡散槽のなかに放射線の通過による飛跡が観測される。原理はジェット機の飛跡に沿って飛行雲ができるように，高速の粒子が過飽和層を通過する時に，飛跡に沿ってできる電離イオンのまわりに霧滴が成長して目に見えるようになることを利用したものである。

霧箱では，比較的電離量の多いα線がきれいに測定される。そこで，講義においては花崗岩や，増富鉱泉で採取した堆積岩などを拡散槽内に置いて，α線の飛跡を観察した。ラジウムやウランの放出するα線の空気中の飛跡の平均の長さは3cmなので，太さ2～3mmで3cmの飛跡を30秒に1個位の割合で観測した。一方，線源を入れなくても，宇宙線(主として高速の陽子)が地球大気に衝突してできるミュー粒子(μ)が1～2分に1個観測された。時にはこれより重いK粒子が観測されることもあり，素粒子の誕生の過程を見ることができた。

環境放射線の視覚化

霧箱で見ているミュー粒子は，宇宙の彼方で星が誕生し，その時合成された水素の原子核が長い長い旅をして地球にたどりつき，空気の分子と衝突して別の粒子になって，今，私達の目にふれたということを意味している。また岩石からでるα線は，46億年前地球が出来たときに，たまたまそこにあったウランやトリウムといった放射性の元素が地球にとりこまれ，46億年経った今壊れて他の元素に変わったということをしらせているわけで，サーベーメーターのピッピッと鳴る音や，霧箱の中の飛跡はいわば過去からの手紙である。

以上のように，本プロジェクトを組織することによって，身の回りには様々な放射線が飛び交っていることを，実際に学生が体験するための試みとして，霧箱や線量計を購入することができた。実際，授業の終了時には環境放射線や放射能について，学生の理解は著しく進んだように，本質の理解には視覚化することが有効であることがわかったので，今後ともより理解しやすい講義のために努力を続けていきたい。