

台風到来時の降水の酸素・水素安定同位体比の変動特性

Characteristics of the $\delta^{18}\text{O}$ and δD
in the Case of Typhoons at Tsukuba in 2001 and 2002

藪崎 志穂*・田瀬 則雄**

Shiho YABUSAKI* and Norio TASE**

Abstract

To investigate the characteristics of isotopic composition of typhoon samples as the time proceeds, precipitation samples of five typhoon events were collected at Tsukuba, in 2001 and 2002. Isotopic compositions of typhoon's precipitation vary over wide range, and at the time when the typhoon's eye passed over observation site in Tsukuba, isotopic compositions decrease rapidly. Isotopic compositions of all typhoon samples are approximately on the local meteoric water line. Typhoon No. 15 in 2001 and No. 6 in 2002 of which total precipitation amount exceed 60 mm, isotopic compositions are more lighter than those of weighted mean of annual precipitation in Tsukuba. When the intensive precipitation happen, especially, the stable isotopic compositions of precipitation can be used for estimation of the soil water movement.

I はじめに

近年、地下水流動系や地中水の挙動の解明を行う際に酸素・水素安定同位体比を用いる方法が行われている。日本のような湿潤気候下においては、降水による涵養量は相対的に多く、同位体データを用いて地下水の涵養機構および土壤水の浸透等について考察を行うためには、降水の同位体比データの必要性が増す。特に台風のような多くの降水量の発生時には土壤中への涵養量も多く生じるため、土壤水の挙動に与える影響は

大きく、台風時の降水のデータを得ることは重要であると考えられる。しかしながら、台風時の降水の同位体比を測定した研究には、Matsuo and Friedman (1967) の東京での観測、Gedzelman and Lawrence (1982) のニューヨークでの観測値とモデルから計算した値を比較した研究、Ohsawa and Yusa (2000) の九州における 1993 年の台風 13 号、1996 年の台風 6 号の連続観測や、小島ほか (2000) の長岡市における 1998 年の台風 10 号の観測、有田 (2004) の南アルプス北端に位置する北岳において 2001 年・2002 年の台風

* 筑波大学生命環境科学研究科大学院生

** 筑波大学生命環境科学研究科

通過時の降水の水質や同位体比の変動特性を明らかにした研究などがあるが、その数は少ない。本稿では2001年および2002年に関東地方に上陸した5つの台風イベントの観測結果および酸素・水素安定同位体比の変動特性について報告する。

II 研究方法

降水の採水は、筑波大学構内（北緯36度05分，東経140度06分，海拔標高30 m）の研究棟の屋上に蒸発防止装置を有した採水装置（Shimada *et al.*, 1994）を用いて月毎，及びイベント降水の採水を実施している。この装置を用いて，台風到来時の降水についても採水を実施した。

台風サンプルは，2001年と2002年において，台風の中心がつくば市上空を通過，あるいは接近した場合について採水を行った（2001年：台風11号（8/21～22），台風15号（9/10～11）；2002年：台風6号（7/10～11），台風7号（7/16），台風21号（10/1））。降水の採水は1時間毎に実施し，イベント降水と同様に採取量の計測を行った。

イベント降水，月単位の降水および台風到来時の降水のすべてのサンプルについて，酸素・水素安定同位体比測定を実施した。酸素安定同位体比は炭酸ガスとの同位体平衡法を用い（Epstein and Mayeda, 1953），水素安定同位体比は金属亜鉛を用いた還元法（Coleman *et al.*, 1982）により水素ガスを発生させ，それぞれ質量分析計（Finnigan MAT 252）にて測定を実施した。測定結果は，標準平均海水（V-SMOW）からの千分偏差率で表示した。測定精度は， $\delta^{18}\text{O}$ 値で $\pm 0.1\%$ ， δD で $\pm 1\%$ である。

気象データは，筑波大学から南東約9 kmに位置する高層気象台（つくば市，館野：北緯36度03分，東経140度07分）の気象月報および気象日報を利用した。

III 結果

1. 各台風の概要

台風11号と15号（2001年），台風6，7，21号（2002）の経路図をFig. 1に示した。

台風11号は，2001年8月14日21時，フィリピンの東海上で発生した熱帯低気圧が北東へ進み，マリアナ諸島の北の海上で台風となった。台風は発達しながら日本の南海上を東北東へ進み，17日3時に超大型で強い台風となった。台風は勢力を維持しながら東北東へ進み，19日3時に南大東島の東の海上で大型で強い台風となり，向きを北よりに変えた。21日19時過ぎに和歌山県

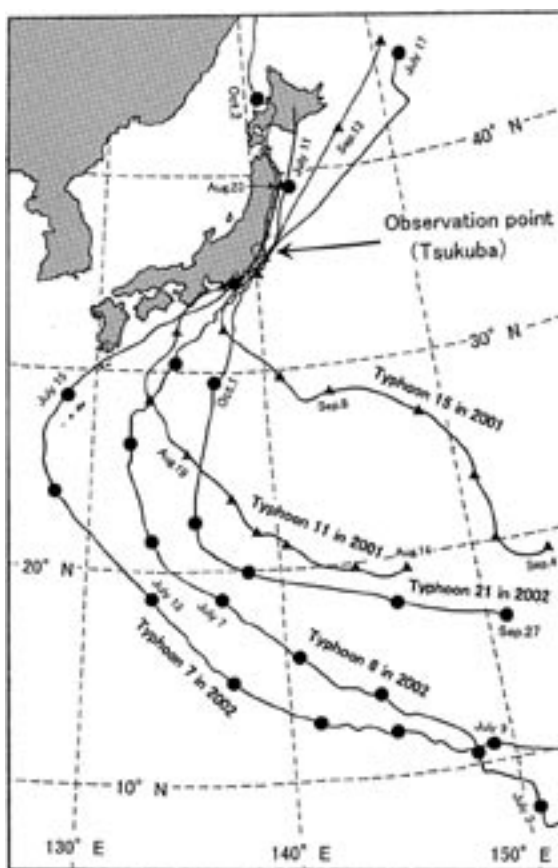


Fig. 1 Path of the typhoons
in 2001 (▲): Typhoon 11 and 15
in 2002 (●): Typhoon 6, 7 and 21

南部の串本町付近に上陸した。台風は比較的遅い速度で東北東へ進み、22日12時ごろ伊豆半島の静岡県土肥町付近に再上陸した。その後、次第に速度を上げ、22日16時前に千葉市付近に再上陸した後、同日夜には東北地方へと抜けた（東京管区气象台、2001a）。

台風15号は、2001年9月4日9時、マリアナ諸島の東海上に発生し、発達しながら北西に進み、7日18時には小笠原の東海上約1100 kmの海上に達し、中心気圧950 hPa、最大風速40 m/sの大型で強い台風に発達した。その後、台風は強い勢力を維持しながら太平洋高気圧の縁を西または北西進し、10日朝には潮岬の南海上に達し、次第に北から北東に向きを変えて、毎時10 km/hの速度で東海地方沿岸に接近した。11日早朝には伊豆半島をかすめて、相模湾に入り、11日9時30分頃鎌倉市付近に上陸し、その後、関東地方の平野部を北北東に進み、昼前東京都心を通り、11日15時には茨城県中部に達し、暴風域はなくなった。上陸時の中心気圧は970 hPa、最大風速は30 m/s、中心からの半径60 kmの暴風域を伴っていた。11日21時には仙台市の南東約100 kmに達し、さらに北東進し、12日6時根室市の東北東約240 kmの海上で温帯低気圧となった。台風の動きがゆっくりであったことから、広い範囲で長時間に渡り雨が降り続き、強い風が吹いた（東京管区气象台、2001b）。

2002年の台風6号は、6月29日15時にトラック島近海で発生し、7月8日には南大東島付近で中心気圧930 hPa、中心付近の最大風速50 m/sの大型で非常に強い台風となった。7月10日9時には室戸岬の南海上で中心気圧965 hPa、中心付近の最大風速30 m/sとやや勢力を弱め、その後、本州の南海上を北東に進み、11日午前0時頃、千葉県富津市付近に上陸し、房総半島を縦断後、茨城県沿岸を北上した（東京管区气象台、2002a）。

台風7号は、2002年7月8日9時にトラック

島近海で発生し、13日にはフィリピン東海上で中心気圧945 hPa、中心付近の最大風速45 m/sの大型で非常に強い台風となった。15日21時には本州南岸に達し、中心気圧975 hPa、中心付近の最大風速30 m/sとやや勢力を弱めたが、その後はその勢力を保ったまま本州の南岸を北東に進んだ。16日9時過ぎに伊豆半島南部に上陸した後、16日11時前に房総半島南部に再上陸し、北東に進んで13時前には銚子付近から鹿島灘に抜けた（東京管区气象台、2002b）。

台風21号は2002年9月27日15時にマリアナ諸島付近で発生し、9月29日には沖ノ島島付近で中心気圧935 hPa、中心付近の最大風速45 m/sの非常に強い台風となった。9月30日には強い勢力を保ったまま、速い速度で北に進み、三浦半島を通過後、10月1日20時半頃神奈川県川崎市付近に上陸した。その後、茨城県を縦断し、東北地方の太平洋岸を北上した（東京管区气象台、2002c）。

2. 台風到来時の降水の同位体比の変動特性

台風11、15号（2001年）、台風6、7、21号（2002年）の気象データおよび同位体比データの時系列グラフをFig. 2a～Fig. 2eに示した。降水量は、採取量から換算した値、気圧および風速は高層气象台測定値を用いた。総降水量はそれぞれ40.3 mm、72.4 mm、60.2 mm、22.1 mm、49.8 mmであり、関東地方内においてもつくば市周辺は相対的に降水量が少ないという傾向が現れている（東京管区气象台、2001a、2001b、2002a、2002b、2002c）。台風は、中心の雲の無いeye（台風の眼）、eyeを取り囲む積雲対流のリングであるeye wall（眼の壁）、その外側にあるらせん状の雲バンドのspiral band（スパイラルバンド）から構成されており、その外側は下降域で雲が無い状態になっている（Houze, 1993）。各台風の降水のデータでは、降水量のピークが複数生じているものがあり、これら複数のスパ

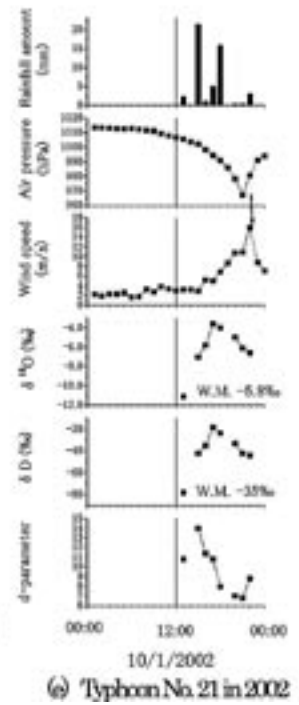
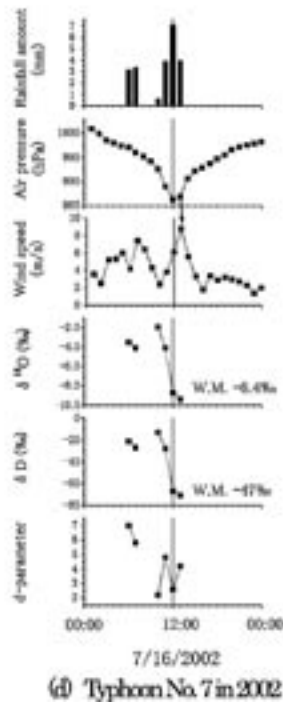
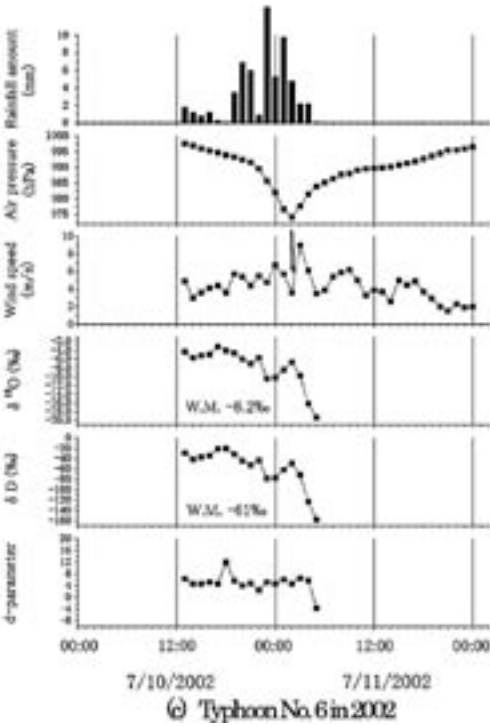
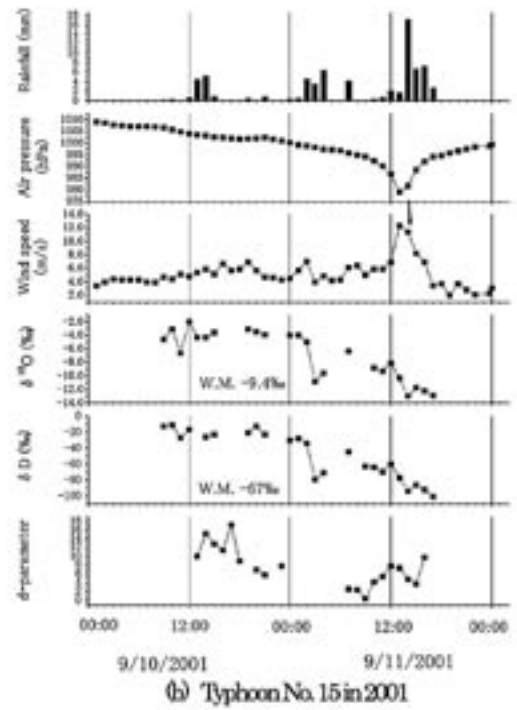
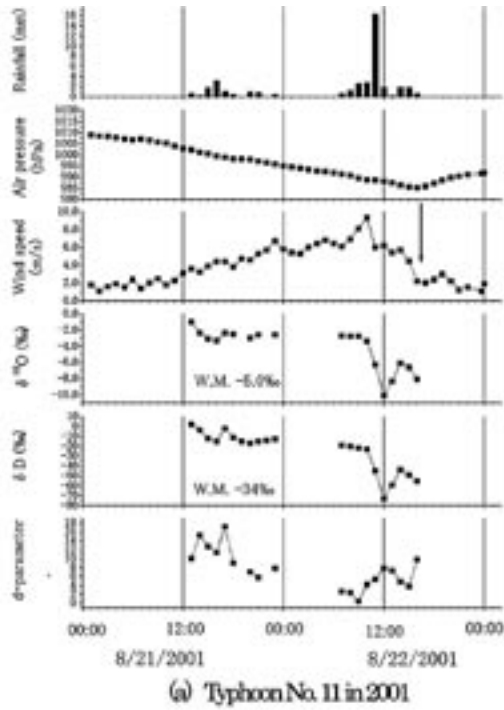


Fig. 2 Observation data of each typhoon events
 Arrow indicates the time when the typhonic center passed through the observation site.
 W.M. is amount-weighted mean value of isotopic composition.

イラルレインバンドが上空を通過したことによると考えられる。特に台風 11, 15 号ではこのような特徴が顕著にみられるが (Figs. 2a, 2b), これは台風が関東地方に接近・通過時において, スパイラルバンドが発達してより明瞭に複数の降雨帯が形成されていたことに起因していることが, 赤外画像データ, レーダーエコーデータ等から推定される (高知大学気象情報頁, <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>; 東京大学生産技術研究所, <http://www.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/SIAIIS/index.html> 等を参照した)。

気圧と風速のデータ観測結果では, 気圧の最小値が示されている時点の前後において, 風速の最大値があらわれている。台風の中心のやや外側に形成された eye wall では強風域が形成されていることから, この時間帯に台風の中心が上空を通過しているとみなすことができる。また, 風向もこれらの時間帯 (図中の↓で示した時刻) で変化する傾向があらわれており (主に南西から南 (南西) 方向への変化), この結果からも台風の中心部の通過時刻の推定を行うことができる。降水量のデータをみると, 台風の中心が通過した時間帯の前後で, 相対的に多くなる傾向があらわれている。しかしながら, 台風 21 号 (2002) では, 降水量のピークは台風の中心部が通過する数時間前に最大値があらわれており, 他の台風とは異なった降水パターンを示している (Fig. 2e)。

酸素・水素安定同位体比の時系列データでは, 台風 21 号を除き, 時間の経過と共に軽い値となる傾向が示されている。特に, 台風の中心が通過した前後の時間帯においては, 同位体比の変動は非常に大きく, 軽い値に変化することが明瞭にあらわれている。また, 台風 11, 21 号を除いた台風の降水終了時の同位体比は, 最も軽い値を示していることも認められる。更に, 複数の降雨イベントが確認される台風 11, 15, 6 号においては, 台風が通過する前の降水の同位体比はほぼ一定値を示す傾向がみられる (Figs. 2a, 2b, 2c)。各

台風の酸素・水素安定同位体比の加重平均値をみると (Fig. 2 の W.M.), つくばの降水の年加重平均値 ($\delta^{18}\text{O}$: -8.5% , δD : -54%) に対して, 総降水量が比較的多い (総降水量が 60 mm 以上の) 台風 15 号と台風 6 号の同位体比はつくばの降水の年加重平均値よりも軽い値を示し, 他の台風では相対的に重い値となっている。台風の同位体比の時間変化から, 降水量が多い時間帯の降水の同位体比は軽い値を示す傾向がみられる。d-parameter (d-excess) 値は, 台風の中心が通過する前までは時間の経過と共に低くなっているが, 中心が通過する前後で値はやや上昇した後, 再び減少する傾向があらわれている。しかし, 台風 7 号および 21 号ではサンプル数が少ないため, この特徴は顕著には認められない。こうした台風の同位体比の時系列変化は, Matsuo and Friedman (1967) や Ohsawa and Yusa (2000) の観測においても確認されている。

各台風の δ ダイアグラムを Fig. 3 に示した。いずれの台風のデータにおいても, 回帰直線の決定係数が 0.95 以上 (相関係数では 0.97 以上) となっており, $\delta^{18}\text{O}$ と δD の強い正の相関が認められる。また回帰線の傾きは台風 21 号を除いて 8.1 ~ 8.4 とほぼ同様の値となっていることが示された。この傾きは, つくばにおける月降水およびイベント降水の天水線の傾きに対してやや大きく, Craig (1961) によって求められた天水線 (global meteoric water line) に近い値となっている。

IV 台風起源の降水の同位体比の形成過程について

台風起源の降水の同位体比には, III の 2 で示したような変動傾向が現れていた。これらのデータを基に, 台風の構造や降水の形成について若干の考察を試みた。台風の構造は台風の眼 (eye) を中心にして, 外側の eye wall, 更にそれらを取り巻くようにして spiral rain band が同心円状に存在する構造となっている (Houze, 1993)。台風域

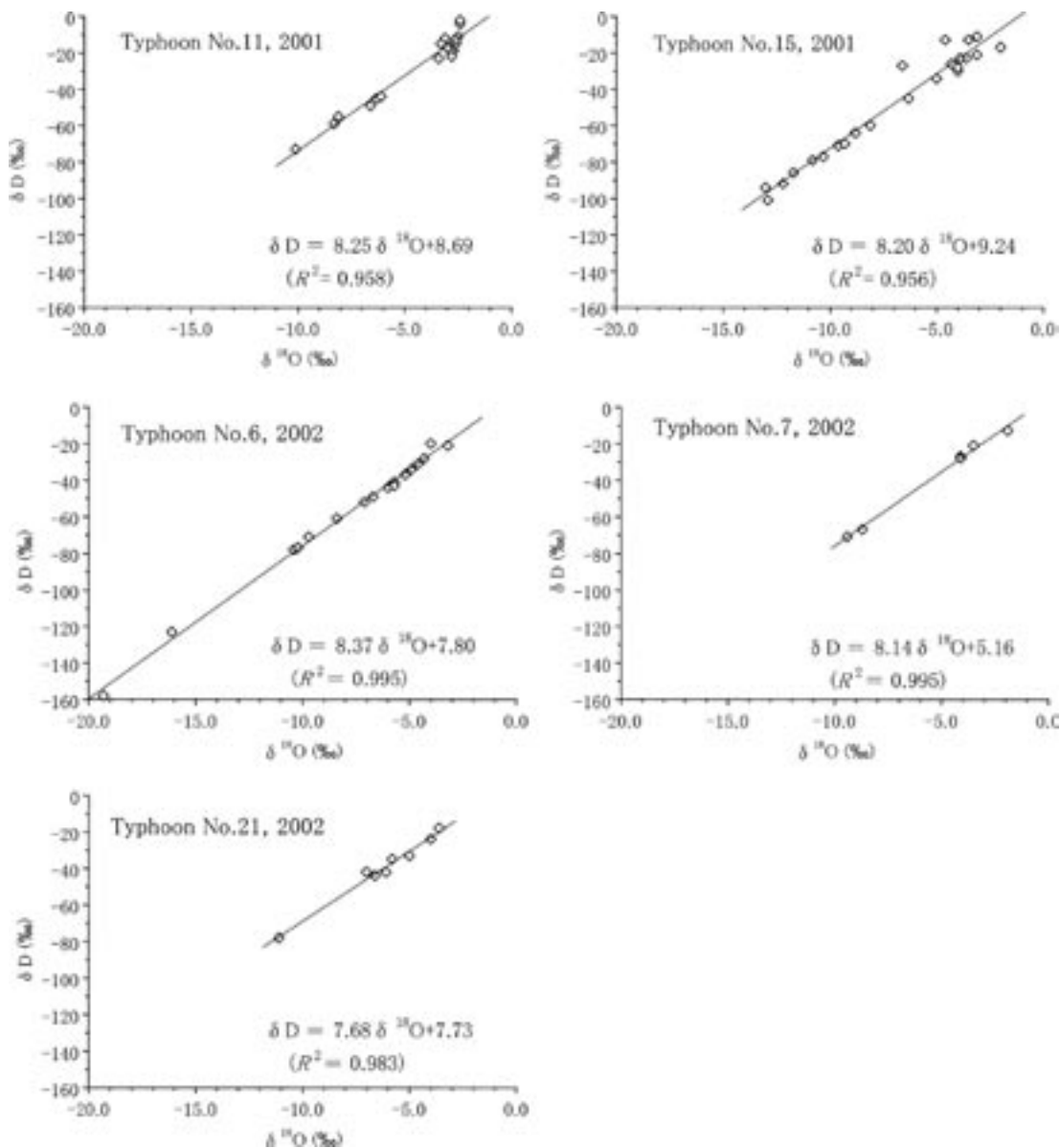


Fig. 3 δ - diagram of each typhoon sample

内の降雨帯では非対称な降雨分布が示されており（榊原，2000），また風速も進行方向に向って右側で強くなるという非対称性を示すことが報告されている（山岬，1976）．一方，同位体比データについては対称性がある程度確認されるが，中心通過後の方が相対的に軽い同位体比の降水が発

生する傾向がみられる．この結果から，台風の中心の前方と後方とで降水の形成過程に違いが生じていることが想定される．Sugimoto and Higuchi (1989) は，対流性の雲の発達過程における降雪の同位体比の変動について観測とモデルをたてて考察を行っており，雲内の上昇気流が弱くなる

時間帯に最大降雨強度が発生し、この時間の前後で同位体比の減少率は大きくなることを示した。eye wall では上昇流が最も強く生じているが、その外側の rain band 域では対流が活発であり、下向きの空気塊の移動が発生している（山岬，1976；榊原，2000）。台風を中心の後方で発生した降水の同位体比の方が前方の値よりも軽い値を示していることから、後方域の方が空気塊の上昇流が弱く、より軽い同位体比を有する（小さな粒径の）降水が降下していることが考えられる。

台風によってもたらされた降水が土壤中に浸透しその後の挙動を追跡してゆく場合には、降り始めから降水が終了するまでを一つのイベントとして捉えることが必要であると考えられる。従って、Fig. 4a～Fig. 4e に 2001 年の台風 11，15 号，2002 年の台風 6，7，21 号の降水量と酸素・水素安定同位体比の時間積算値を示した。これらのデータでは、まず、降水量が少なく降水量の積算地がほぼ横這いとなっている時間帯では、同位体比についても同様にほとんど変化が生じていないことが確認された。Dansgaard (1953) や Matsuo and Friedman (1967) では、rain showers（にわか雨，夕立）において、降水発生中の同位体比は一定値となることが示され、これは降水の元となる気塊と液相（降水の粒子）が mixing しているためであると説明されている。同位体比が一定となっている時間帯の降水量は少ないことから、降水の起源となっている水蒸気塊（セル）は比較的小さいと考えられる。規模の小さい水蒸気塊は比較的 mixing が発生しやすいと考えられることから、これらの同位体比が一定値を示す時間帯の降水は、mixing された状態の空気塊（水蒸気塊）から形成されているという可能性が示唆される。

Fig. 4 のデータについては、時間の経過と共に同位体比は軽くなっている。Fig. 4e（台風 21 号，2002 年）の場合のみ上記のデータとは異なり、降り始めの降水の同位体比は相対的に軽く、数時

間後以降はほぼ一定した値となるような変動を呈している。台風 21 号は台風の中心が通過する前に総降水量の大部分が降っており、中心が通過後には降水はほとんど発生しておらず（Fig. 2e），他の台風とは異なった降水パターンを示していることがこの原因であると考えられる。Fig. 4 の台風データにおいて、積算降水量が急激な増加を示している時点においては、同位体比も軽い方向に大きく変動しており、これらの時間帯は台風の中心が通過した前後に相当している。この結果は、降水強度が強い時間帯に同位体比が急激に減少するという、対流性の雲から発生する降水を対象とした他の研究と一致しており、台風による降水においても、対流性の水蒸気塊が起源である降水と同様の同位体比の形成過程が発生している可能性が示唆される。さらに、降水が終了した付近の時間帯で同位体比が最も軽い値を示している場合が多く、これは Rayleigh の蒸留モデルで示されているようなシステム（水蒸気から ^{18}O に富んだ水が次々に取り除かれるため、残った水蒸気は徐々に ^{18}O に乏しくなってゆき、その水蒸気から凝縮する水（降水）も徐々に ^{18}O に乏しくなり、結果として降水の同位体比は段々と軽くなってゆくというシステム）が発生しているためであると考えられる。

d-parameter 値の変動も、台風時の降水の発生過程の推定に利用することができると考えられる。すべての台風において、d-parameter 値は台風の中心が通過する前は相対的に値が高く、中心が通過した後では相対的に低くなるといった変動傾向が明確にあらわれている（Fig. 2）。d-parameter の値は、相対湿度，風速，そして水蒸気の起源となる海水が蒸発する際の海面温度の影響を強く受けており（Clark and Fritz，1997），一般的に海面からの蒸発速度が速いほど d-parameter 値は大きい値となる。従って、d-parameter 値が相対的に大きい値を示している台風の中心が通過する前の降水の水蒸気は、海水

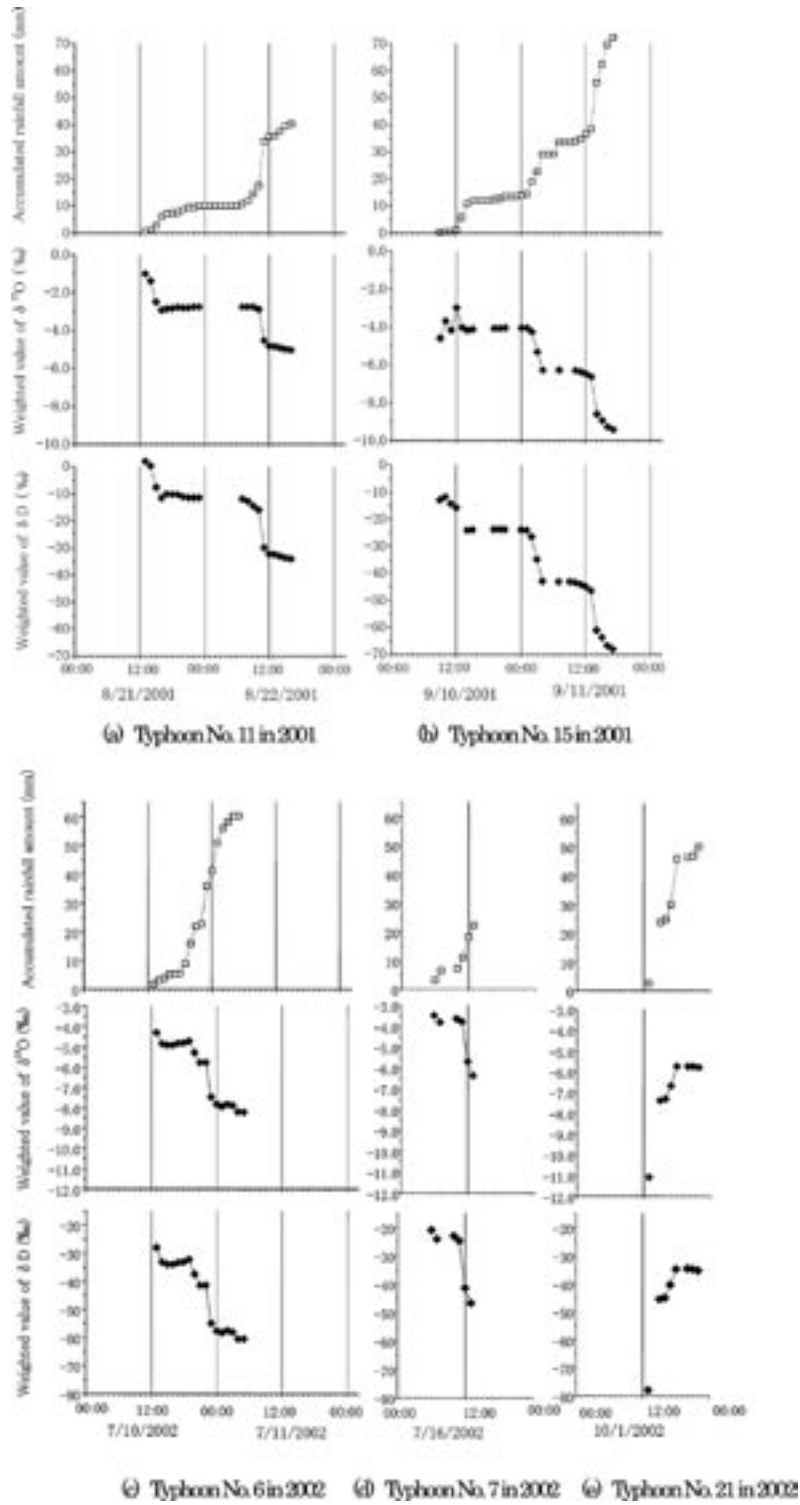


Fig. 4 Accumulated data of rainfall amount and weighted values of $\delta^{18}\text{O}$ and δD of each typhoon

面から比較的速い速度で蒸発して形成されたものであり、台風が通過後の d-parameter が相対的に低い降水は、海水面からの蒸発が比較的緩やかに生じて形成されたものである可能性が示唆される。台風の構造から、中心の後方 (rear) の方が前方 (front) よりも風速などの勢力が弱く、海面からの蒸発がより緩やかに生じていることが、このような台風時の降水の d-parameter 値の変動をもたらしている原因であると考えられる。こうした傾向は Ohsawa and Yusa (2000) でも示されており、台風時の降水の特徴の一つとして認められる。また、各台風によって d-parameter 値の絶対値は異なっており、台風 11, 15, 21 号では台風 6, 7 号に対し全体的に高い値を示している。前者の台風はそれぞれ 8, 9, 10 月に、後者は両方とも 7 月に観測された台風である。d-parameter 値は湿度との相関が認められており、湿度がより高い場合には d-parameter 値は小さくなる (Merlivant and Jouzel, 1979)。台風の発生した月における湿度の違いによって、こうした d-parameter 値の差異が生じていると考えられる。このような季節によって d-parameter 値が異なるという現象はイベント降水の結果でもみられ、台風においても通常の降水の同位体比の形成と同様のメカニズムが関与していることが示唆される。

以上のように台風通過時の降水の同位体比の時間変化について明らかにすることができ、降水の同位体比は台風の構造と関連していることが示された。また、台風に起因する多量の降水が発生した場合には、相対的に多くの水が土壤中へと浸透することになる。台風時の特に降水強度の強い時間帯の同位体比は相対的に軽い値を示すことから、台風によってもたらされた降水の同位体比は土壤水中の同位体比の鉛直プロファイルに (同位体比の軽い) スパイクとして残されると考えられる。このようなことから、土壤水の挙動を考察する際のトレーサーとしての利用価値が高いとい

うことも示された。しかしながら、今回つくばで観測されたデータには、他の観測例とは異なった結果 (例として台風の δ 値の時間変動のパターンなど) が生じている傾向もみられ、これらのことをさらに明確にするためには同じ台風について異なった観測地点での観測を行うなど、より詳細な観測が必要であると考えられる。

V おわりに

2001 年, 2002 年に関東地方上空を通過した台風による降水の同位体比の観測結果から、ほとんどの台風において降水の同位体比は時間の経過と共に軽くなる傾向がみられた。また台風の中心付近が通過した降雨強度が強い時間帯では、降水の同位体比の減少が大きくなっており、これは台風の構造 (台風の眼の外側を取り囲むようにして存在している上昇気流が強く生じている eye wall と、さらにその外側に形成されている対流性を示す spiral rain band) の影響を受けているものと考えられる。d-parameter 値の時系列データを見ると、台風の中心が通過する前と通過後では、前者の方が相対的に値が大きいことから、台風の中心よりも前方 (front) において、より海面からの蒸発が速い速度で生じて形成された水蒸気が降水の起源となっているということが示唆された。全体的にみると、降雨強度の強い時間帯の降水の同位体比は相対的に軽く、また総降水量が多い台風では同位体比の加重平均値も軽くなる傾向が示された。台風による多量の降水が発生した時では土壤中への浸透量も相対的に多くなり、降水の同位体比が土壤水の同位体比鉛直プロファイルにスパイクとして残されると考えられる。このようなことから、土壤水の挙動を考察する際のトレーサーとして台風イベントを利用することが有効であると考えられる。

謝辞

京都大学理学研究科の大沢信二助教授には大変有益な論文を頂きました。心より御礼申し上げます。また懇切な指摘を頂きました査読者の先生方にも御礼申し上げます。

本件研究はリサーチ・アシスタント（プロジェクト名『地球水物質循環解明のための環境トレーサー学』、代表：田瀬則雄）の補助を受けて遂行しました。

文献

- 有田 真 (2004)：北岳における酸性雨・酸性霧の地球科学。筑波大学大学院生命環境科学研究科，修士論文，68p.
- 小島隆志・山田隆二・陶 冠紅・神田尚子・東浦將夫 (2000)：降雪・降雨中の水素・酸素同位体比の動的変動。水環境学会誌，**23**，173-176.
- 榊原 均 (2000)：気象レーダーによる台風の観測と解析。気象研究ノート，**197**，77-130.
- 東京管区气象台 (2001a)：平成 13 年 台風 11 号に関する資料。東京管区气象台ホームページデータ。
- 東京管区气象台 (2001b)：平成 13 年 9 月 台風 15 号に関する資料。東京管区气象台ホームページデータ。
- 東京管区气象台 (2002a)：平成 14 年 7 月 台風 6 号に関する資料。東京管区气象台ホームページデータ。
- 東京管区气象台 (2002b)：平成 14 年 7 月 台風 7 号に関する資料。東京管区气象台ホームページデータ。
- 東京管区气象台 (2002c)：平成 14 年 10 月 台風 21 号に関する資料。東京管区气象台ホームページデータ。
- 山岬正紀 (1976)：台風の構造と発達の方学。気象研究ノート，**129**，1-63.
- Clark, I. and Fritz, P. (1997): *Environmental isotopes in hydrology*. Lewis Publishers, 328p.
- Coleman, M. L., Shepherd, T. J., Durham, J. J., Rouse, J. E. and Moore, G. R. (1982): Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. *Analytical Chemistry*, **54**, 993-995.
- Craig, H. (1961): Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, **133**, 1702-1703.
- Dansgaard, W. (1953): The abundance of ^{18}O in atmospheric water and water vapour. *Tellus*, **5**, 461-469.
- Epstein, S. and Mayeda, T. (1953): Variation of ^{18}O content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **4**, 213-224.
- Gedzelman, S. D. and Lawrence, J. R. (1982): The isotopic composition of cyclonic precipitation. *Journal Applied Meteorology*, **21**, 1385-1404.
- Houze, R. A. (1993): *Cloud dynamics*. Academic press, 573p.
- Matsuo, S. and Friedman, I. (1967): Deuterium content in fractionally collected rainwater. *Journal of Geophysical Research*, **72**, 6374-6376.
- Merlivant, L. and Jouzel, J. (1979): Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen-18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Research*, **84**, 5029-5033.
- Ohsawa, S. and Yusa, Y. (2000): Isotopic characteristics of typhonic rainwater: typhoons no. 13 (1993) and no. 6 (1996). *Limnology*, **1**, 143-149.
- Shimada, J., Matsutani, J., Dapaah-Siakwan, S., Yoshihara, M., Miyaoka, K. and Higuchi, A. (1994): Recent trend of tritium concentration in precipitation at Tsukuba, Japan. *Annual Report, Institute of Geoscience, University of Tsukuba*, **20**, 11-14.

Sugimoto, A. and Higuchi, K. (1989): Oxygen isotope variation of falling snow particles with time during the lifetime of a convective cloud: observation and modeling. *Tellus*, **41B**, 511-523.

(2004 年 6 月 3 日受付, 2004 年 9 月 8 日受理)