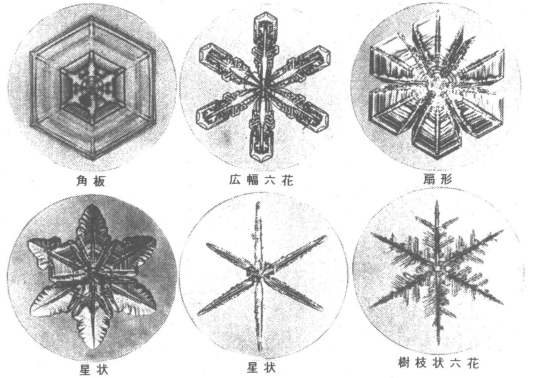


中谷ダイアグラムと拡散式人工雪作成法の問題\*

対馬 勝年\*\*

1. 雪結晶の分類

積雪寒冷地で身近に見られる雪の結晶は形の美しさ、繊細さ、見事な対称性において多くの人々を魅了してきました。天空から舞い降りる無数の結晶、雪の妖精は千差万別であり、どれとして同一の結晶はないと言われます。しかし、そのような雪結晶の類似性に注目して、中谷宇吉郎は針状結晶、角柱状結晶、板状結晶、角柱・板状組み合わせ結晶、側面結晶、雲粒付結晶、不定形の7種類に大分類し、さらに板状を正規六花結晶、十二花結晶、奇形結晶などに細分した18種類の中分類、正規六花結晶を角板、扇型、星状、樹枝などのように細分した41種の分類図表を作りました。



第1図 各種の雪の結晶 (小林著, 1983: 冬のエフェメラルより引用).

大分類は主に温度によって決まり、小分類は水分量も関係した分類であるといえます。

さて、雪の結晶形がなぜ第1図のように異なるのでしょうか。結晶は雲の中で形成されるのですから、雲の温度や雲の濃淡(含水量)などに関係するに違いありません。そのような洞察から世界で最初に人工雪の実験に取り組んだのが有名な中谷博士です。

2. 中谷の人工雪作成法

中谷は天然の雪結晶形成の状態を模倣して第2図に示す自然対流型の装置を考案し、人工雪を作成しました。この実験結果から、温度と全含水量によって雪の結晶形を分類した中谷ダイアグラムは国際的に有名になりました。

中谷の人工雪実験装置は水分供給源、二重管(上昇と下降)、結晶成長空間の三部分から構成されます。水

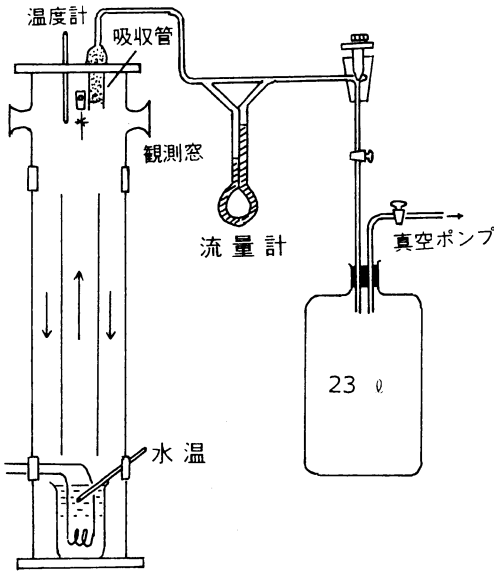
蒸気を補給された空気は軽くなって内管を上昇します。水面から離れるにつれ冷え、水飽和の条件では雲粒を含む状態となります。水蒸気と過冷却水滴を含む環境(雲)が成長空間に形成され、ウサギの毛に雪の結晶が成長していきます。装置は低温実験室の中にあり、外筒の空気は冷えて下降するため、空気の循環(対流)が生じます。天然の雲発生の様子を巧みに取り入れた装置であり、対流法と呼ばれます。

ウサギの毛に発生する結晶形は成長部付近の気温と水温によって変わりました。水温を高くすると、水分量の補給が多くなり、より複雑な結晶形に変わっていききました。中谷は結晶の周りから採取した空気を五酸化燐の筒に通し、質量の増加を計測しました。単位体積当たりの水分量が決定され、第3図の縦軸が導かれました。図の縦軸は測定された水分量を氷飽和水蒸気密度で割った値です。中谷は縦軸を氷に対する過飽和度と表記しました。この「過飽和度」が本論の話題となります。

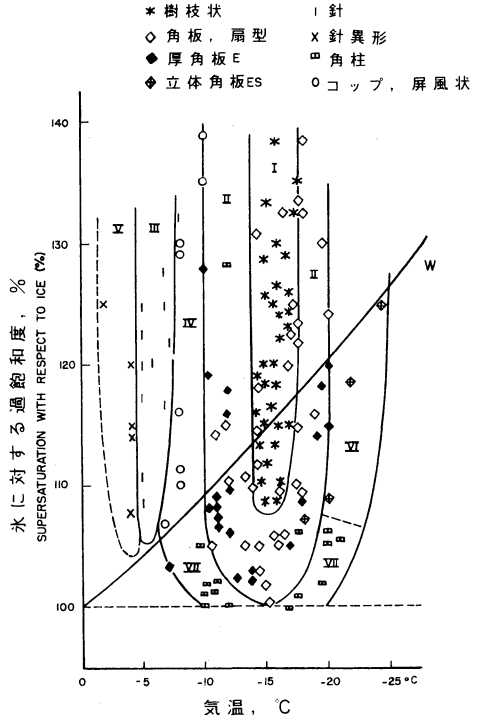
中谷はまた雪は天から送られた手紙であるという有

\* Problems of Nakaya's Diagram and diffusion cloud chamber for growing ice crystals.

\*\* Katutosi Tusima, 富山大学理学部.



第2図 中谷の対流型人工雪作成法 (Nakaya, 1954: Snow crystals より引用).



第3図 中谷ダイヤグラム (Nakaya, 1954: Snow crystals より引用).

名な言葉を残しました。手紙を読み解く辞書が中谷ダイヤグラム (第3図) であり、地表に到達した結晶は上空の雲の温度と水分量についての情報を伝えます。

空気 (雲) 1 m<sup>3</sup>中に含まれる水蒸気量 (g/m<sup>3</sup>) には飽和水蒸気密度と呼ばれる上限があります。雲の中では「水に対する飽和水蒸気密度」が上限となります。これとは別に、降雪のように氷を含む空気に対しては「氷に対する飽和水蒸気密度」も存在します。どちらも温度によって変わり、氷に対する密度の方が小さいことも知られています。そのため、雲の中に氷晶が発生すると、氷晶に水蒸気が集まって雪結晶へ成長し、一方、まわりの雲粒は蒸発し消失してゆきます。

中谷ダイヤグラム (第3図) は多くの著書や辞典に引用されてきましたので、温度と「過飽和度」によって結晶形が分類されると理解している読者がほとんどであると思います。私自身も図表だけを鵜呑みにし、講義などで中谷の図を引用しては、何の疑問も懐くことなく、温度と「過飽和度」によって雪の結晶形が決まると伝えてきたものでした。

### 3. 中谷ダイヤグラムの「過飽和度」への疑問

筆者の自己否定にもなるのですが、雲の中に結晶ができるのに、なぜ雲が水飽和以上の過飽和になりうるのでしょうか？ 雲は微水滴の集まりなのですから、水飽和以上の過飽和はあり得ないと思われま

す。宇宙線研究に用いられた霧箱の中では、水蒸気が極めて高い過飽和状態にあり、飛び込む宇宙線跡に沿って線状の霧 (水滴) が発生しました。しかし、軌跡から離れた部分は過飽和を続け、過飽和は即座に解消されるものではありません。拡散型人工雪作成装置でも雪結晶が存在するのに高い過飽和が維持されます。

南極ではエンジンの排気ガスやタバコの煙が核となって氷晶が発生することから、広大な雪面上に水蒸気過飽和の大気があるという話も聞きます。そのような類推から、「雲の中でも水飽和以上の過飽和がありうるのだろうか」と自問してみます。しかし、雲の中では無数の雲粒 (微水滴) が接近して存在しています。そのような雲粒に挟まれた空間の水蒸気が水飽和以上の過飽和になるとは考えにくく、やはり疑問として残ります。

雲粒と過飽和水蒸気 (水飽和以上) との共存の可能性を問答してみましょう。成長しつつある雪結晶は、雲粒の蒸発によって水蒸気の補給を受けているはずで

も空間の水蒸気密度は変わりません。ですから、「無数の雲粒の存在下でなぜ（水に対して）過飽和が存在しえるのか」という問題は中谷ダイアグラムを天然の雪結晶に適用しようとするとき、誰もが突き当たる疑問とします。

水滴が存在しない場合なら水飽和以上の高い過飽和も可能です。しかし、小林楨作先生がくどいほど指摘しているように（例えば、小林の名著「六花の美」）、ひとたび水滴が発生すれば過飽和は解消されるというのが物理学の常識です。ではなぜ、中谷、Mason、時には小林自身も含めた大先達の方々は雲粒に対しても過飽和が存在するとし、脈々と「水飽和以上の過飽和」の存在が容認されてきたのでしょうか。

通常最もよく目にし、雪結晶のシンボルともされる「樹枝状結晶」が中谷ダイアグラムでは「なぜ水飽和を越える高い過飽和領域」に記述されるのでしょうか？ そんなことに困惑し途方に暮れてしまいます。

私はこの問題は水蒸気量計測の検討から論議するのが肝要であると考えてきました。雲の中から粒径数ミクロン〜数十ミクロンという微小水滴を分離し、水蒸気だけを計測器に採取することは困難と思われまふ。そんなことから、水蒸気量の定義に関わっていると思ひ込み、意識的に問題を回避していた面がありました。つまり、「過飽和は定義の問題」として長い間、自分の中で議論を保留していました。

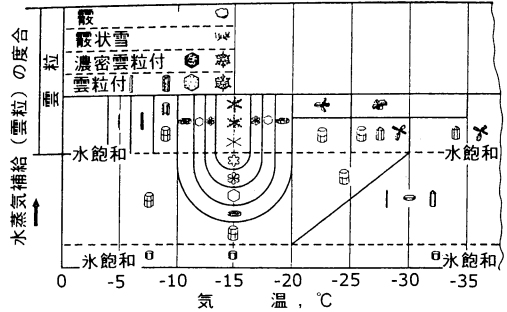
天然の雪結晶を分類した孫野長治はこの辺の問題点をぬめいていたかのように、第4図の分類図を提示しています。自然の観察者らしく、過飽和度の表現を避け、単に水蒸気補給の大小としたこと、図には多くの結晶形が表示されていることが注目されます。

最近の東 晃著「雪と水の科学者・中谷宇吉郎」で東は水蒸気と水滴を含む全含水量とその温度に対する飽和水蒸気量の比を過飽和度と定義すると中谷の定義を正しく伝えています。この定義こそ見落とされていた点でした。

Nakaya の著書“Snow Crystals” (1954) には For representing the degree of supersaturation, we defined the supersaturation value  $s$  as follows :

$$s = (w + \rho') / \rho_0$$

where  $w$  is the liquid water content per unit volume,  $\rho'$  is the vapor density at saturation over supercooled water, and  $\rho_0$  is the vapor density over ice として、図の縦軸  $s$  が定義されています。中谷の定義した  $s$  の分母は水に対する飽和水蒸気密度、分子は



第4図 孫野の天然雪の分類図 (孫野, 1971: 雲と雷の科学より引用)。

単位体積の空気に含まれる雲水量と過冷却水に対する飽和水蒸気密度の和(全含水量)です。中谷はこの  $s$  を「(水蒸気)過飽和度」(この用語だけがその後独り歩きしたことが問題)と命名しました。

「(水蒸気)過飽和度」は物理的にはっきりした定義をもつ用語です。それなのに、東はなぜ異なる定義を追認したのでしょうか。そこにはそれまでの研究史を生かそうとした意図が感じられます。この  $s$  に与えられた専門用語こそ問題の根源だったのです。

雲粒は液相であり、気相の水蒸気とは異なるのですから  $s$  を気相について定義された(水蒸気)過飽和度と名付けたのは適切さを欠いたといえます。

中谷ダイアグラムの縦軸  $s$  は単位体積当たりの全含水量と水飽和水蒸気密度の比(強いて名づけるなら全含水量比)と表記すべきだったのです。

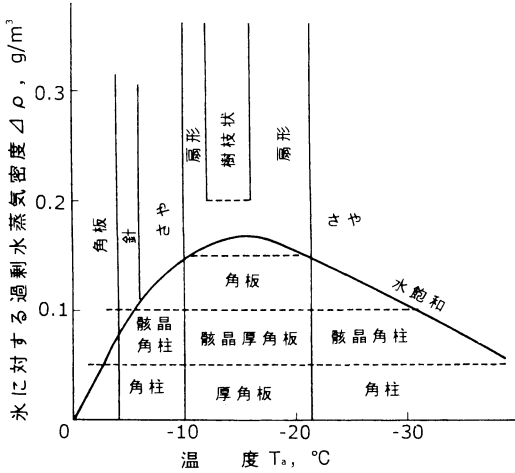
#### 4. 拡散型人工雪作成法には「雲」が存在しない

小林は過飽和度の問題に気付いていました。しかし、小林は真の水蒸気過飽和度で図表を表現し直す道を選びました。

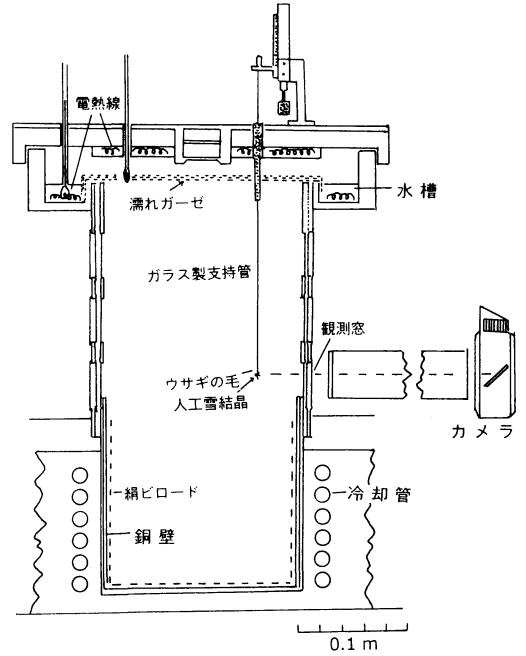
小林は Mason によって開発された拡散法という人工雪作成法を用いて結晶作成に取り組み、中谷ダイアグラムに類似の図を完成させました。そして本人の名前を冠した第5図を発表しました。

ここで、拡散法による雪結晶の作成法を述べます。装置第6図は上部に水源、下部に冷却源があり、対流法とは逆の配置になっています。下部ほど温度が低く、装置内の空気は成層しています。空気に含まれる飽和水蒸気量は、理由は省きますが、温度が高いほど大きいのです。

そのため、上部の水源から下部の冷却部へ水蒸気が拡散によって移動します。下に移動するにつれ温度が



第5図 小林ダイヤグラム(雲のない条件)(小林, 1980: 六花の美より引用).



第6図 拡散法による人工雪結晶作成法(小林, 1957: 低温科学より引用).

下がり、氷点下になります。はじめは装置内に雲が発生しますが、一日も放置しておくと雲粒は落下し尽くし、装置内は過飽和水蒸気だけとなります。

私は当初、拡散法では過冷却の雲が発生して天然の雲と類似の状態が実現されるものと推測していました。しかし、雲粒は重力に引かれ落下してしまうので、雲が存在しない条件になっていました。

小林ほかは雲粒の全くない状態を作ることによって、過飽和状態を実現し、結晶の作成を行いました。

その結果、水蒸気過飽和度によって変化する結晶形が明らかにされ、温度と過飽和度による晶癖変化の機構など、雪結晶の成長機構が詳細に明らかにされていきました。また、中谷ダイヤグラムと殆ど同じ分類図表が得られたことで、中谷ダイヤグラムの正しさを追認することにもなりました。

小林の実験では採取される空気に対し、それを補う空気に十分な注意が払われ、より正確な水分量の計測が行われています。次いで、少量の空気から水分を決定する方法を導入しました。

小林は大気中の雲の中ではいくら過飽和度を上げようとしても、過冷却雲粒を成長させるだけで水飽和以上の過飽和になることは決してないと言っています。拡散箱を用いるとき、自然界では実現不可能な水飽和以上の過飽和が実現されると主張しています。天然の雲の中では水飽和以上の過飽和にはなり得ないとする小林の主張は説得力があります。「過飽和」について、拡散法から導かれる真の「過飽和度」と中谷の定義  $s$  による「過飽和度」の2つが存在することとなり、混乱

を深めたといえます。

### 5. 小林ダイヤグラムは気相成長する氷結晶の分類図表

小林の業績は結晶への水蒸気の流れが環境相と結晶表面の水蒸気密度差に比例することに着目して、中谷ダイヤグラムの縦軸を水蒸気密度差に書き換えたことです。これにより結晶を見事に分類しました。

気象関係者も図表のあまりの明解さに魅惑され、雪結晶の分類図としてもつばら小林ダイヤグラムを引用するようになりました。その結果、雪結晶は雲の存在しない過飽和条件で形成されるという新たな混乱が気象学に導入されました。本来は氷結晶の分類図であつたはずの小林ダイヤグラムを天然の雪結晶分類図と混同すべきではなかったのです。

Nakaya の著書 Snow Crystals の本文にもまた東が中谷の業績をまとめた著書にも水蒸気と雲粒を含めた全水分量を用いて  $s$  を定義しています。 $s$  を「過飽和度」と命名したことの鵜呑みこそ問題の発生源であり、半世紀にも渡って、誤った観念を植え付ける原因となりました。図表だけを信じて、雲の中に水飽和以上の過飽和が存在すると主張するのも誤りです。

過飽和度は空間の飽和水蒸気密度に対する実際の水

蒸気密度の比を表すものであり、雲のもつ全水分量とは無関係です。

振り返ると中谷ダイヤグラムは図表だけが独り歩きし、その前提や成立過程が初期の段階から忘れ去られ、誤解と混乱を生んできました。

ところで、小林の拡散法でも中谷の対流法と同じ結果が得られました。この点をどのように理解すべきでしょうか。

小林ダイヤグラムのたて軸は純粋の水蒸気密度です。「中谷ダイヤグラムも小林ダイヤグラムもほぼ同じ結果になった」という事実は「水滴も水蒸気と等価」という解釈になります。結晶に最も近いところにある水滴は蒸発して水蒸気供給源となります。このように水滴は水蒸気の潜在的な供給源であり、結晶に最接近している水滴から水蒸気の供給が行われるでしょう。したがって、上の解釈が当てはまることになります。誤解を招く恐れがあるので注意しますが、水滴が水蒸気と等価に振る舞っても水飽和を越える高い過飽和が容認されるわけではありません。

仮に、縦軸を水蒸気過飽和度で示すと、結晶は全て水飽和曲線上に乗るか、それよりわずかに低い領域に示されるでしょう。

後で述べる油川式人工雪作成法を用いた薄井たかし(当研究室大学院博士課程)の実験はこの考えを支持し、図表の修正が試みられています。

しかし、残念ながらその修正図表は雲に対する情報を著しく貧弱にします。だから、雲物理学上、縦軸が  $s$  で示される意義は大きいのです。

仮に小林の主張するように小林ダイヤグラムが水蒸気だけを含む過飽和環境にあるのなら、天然の雪結晶に対しても人工の雪結晶に対しても「雪の結晶形と気温や過飽和度の成長条件」を結びつける解説書にはなりえない筈です。小林ダイヤグラムは「純粋の気相成長における氷結晶分類図」であり、結晶成長学上の価値に限定し、気象学とは区別されるべきです。そのへんの曖昧さが含まれるために、実際の雲に当てはめる際に、中谷ダイヤグラムが尊重される理由だと思えます。

付け加えておきますが、天然の雪に当てはまらないとしても、小林ダイヤグラムの価値が下がることはありません。拡散型実験法がその後多くの研究者に採用され、結晶成長の特徴や成長の機構を詳細に解明し、華々しい成果を挙げていったことは特筆されることです。

## 6. 油川による人工雪作成法

近年、一つの光明が孫野長治教授のお弟子さん油川英明教授によってもたらされました。「雲場を顕微鏡のステージ上に再現して結晶を成長させる」新しい雪結晶作成法の開発です。

低温実験室が利用できる場合は第7図の実験容器を顕微鏡のステージにのせて結晶の成長を観察できます。

実験容器(フロッピーケース)に内張りしたポリエチレンラップの上に付着された微水滴は浮遊することはありません。これは雲の中に顕微鏡を持ち込み、浮遊する雲粒と一緒に顕微鏡を移動させながら、結晶と結晶に水分を補給している雲粒群を観察しているようなものであり、画期的な方法です。このケースの中に樹枝状結晶や星形結晶、扇形結晶の成長が示されました。成長する結晶の周りには微水滴が消失した拡散場の領域が広がっていくことから、ケース内が水飽和より低い飽和度であることは明白です。水飽和に非常に近いところでは星形や樹枝状結晶ができ、水飽和より少し飽和度が下がると扇形などの結晶形に変わりました。

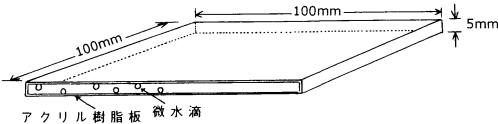
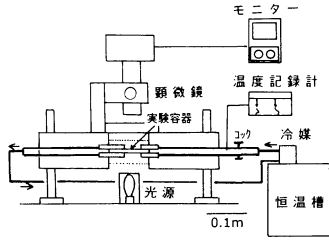
今後、実験容器内の温度、水蒸気密度と成長する結晶形との関係が解明されるなら、中谷ダイヤグラムは水飽和曲線に接する狭い帯状の間に全ての結晶形が記述されるように書き換えられるでしょう。

小林は水滴の蒸発や成長から周囲の環境相の水蒸気密度を求める試みをしました。使用した水滴が大きすぎて正しい値を導けませんでした。

油川法(人工雪作成法としての学術的価値に鑑み、ここでは油川法と呼ばせていただきます)では雲粒サイズの微水滴が膜上に固定され、水滴は顕微鏡の視野の中で消失していきました。水滴の消失過程から周囲の水蒸気密度が見積もられています。

このようにして決定される空間の水蒸気密度は水に対する飽和水蒸気密度の99%以上を占め、結晶が極めて水飽和に近い環境で成長することが裏付けられつつあります。この実験法により、雲中での雪結晶の成長が水飽和以下の水蒸気密度領域に限られることが立証されました。

油川式人工雪作成装置内の空気に流れを与えれば、結晶に向かう水蒸気流つまり水蒸気フラックスが増し、中谷ダイヤグラムで  $s$  (全含水量/水飽和水蒸気密度) の高い領域に記述された樹枝状結晶などが実現されるようになるでしょう。



第7図 油川式人工雪作成法。(油川, 2003: 雪結晶の生成に関する実験的研究(学位論文)より引用).

雪結晶の成長は結晶に向かう水蒸気フラックスに大きく依存するはずですが、拡散法では水蒸気フラックスの目安となる水蒸気密度差を指標としました。中谷の対流方式では結晶のごく近くの微水滴は蒸発して水蒸気の供給源となります。したがって、雲水量は雪の結晶成長に対する水蒸気フラックスの指標になっていると推測されます。このように中谷、小林両ダイヤグラ

ムの縦軸は雪結晶成長に対する水蒸気フラックスを示しているから、ほとんど同じ図表になったと解釈されます。油川によって編み出された新星の「人工雪作成法」により新しい研究成果が発表されることを期待します。

7. おわりに

雪の結晶形は「温度と過飽和度によって決まる」と言われてきました。しかし、雲の中は水飽和なのだから、どうして「過飽和度」が変数になるのかという疑問を生みます。そこが話題の発端でした。

中谷ダイヤグラムの縦軸s「過飽和度」への疑問は、呼び名だけの問題でした。sは全含水量の氷飽和水蒸気密度に対する比であることを知りました。縦軸を一語で表すとすれば何と名付けるべきか、迷うところですが、強いて挙げるなら「全含水量比」とでも呼べるかと思えます。

小林ダイヤグラムの縦軸には過飽和水蒸気密度（と氷飽和水蒸気密度の差）が正しく表記されていました。それは同時に、「雲が存在しない」ことを意味するのであり、適用に注意を要することを知りました。

油川の方法については命名に異論もあるでしょう。しかし、ここではその優れた着想・方法を評価し、敢えて油川法と命名させていただきました。

新刊図書案内

表題	編著者	出版者	出版年月	定価	ISBN	備考
地球・自然環境の本全情報1999-2003	日外アソシエーツ	紀伊国屋書店	2004.08	¥28,000	4-8169-1860-4	
風と光と水のことは季節の横顔を愉しむ	倉嶋 厚 細川 剛	広済堂出版	2004.09	¥2,200	4-331-51062-X	
季節のかたち 四季を彩る美しい日本語	高橋健司	光文社	2004.09	¥857	4-334-78309-0	「風と光と雲の言葉」(講談社1996年刊)の改題
お天気おねえさんのお仕事 気象予報士になる方法教えます	真壁京子	PHP 研究所	2004.10	¥1,250	4-569-68491-2	

注：表中で定価はすべて本体価格です（特記したものを除く）。