

水蒸気の「飽和」概念について*

— 空気は水蒸気を含むか？ —

森 征 洋**

1. はじめに

大気中の現象においては、水が重要な役割を果たしており、水の相変化についての理解が重要である。学校教育において、水の三態変化は小学校理科で習う事項である。小学校理科4年のある教科書には、「水は、じょう発するとき、目に見えない水じょう気にかわって、空気中に出て行く。ゆげは、熱い水じょう気がひえて、細かい水のつぶになったものである。」と書かれている。しかしながら、大学生に聞いてみると、「水蒸気」について科学的な理解を持っている学生は意外と少ない。例えば「水蒸気は見えますか」と聞くと8割くらいの学生は「見える」と答える。湯気と混同しているのである。「水蒸気」という語は、日常的な生活の場で、湯気や霧の発生する現象とともに用いられる場合が多く、しばしば混同して理解されている。国語辞典の扱いについて見ると、『広辞苑』では「水蒸気」の項に「水が蒸発して気体となったもの。」とだけ書かれているが、一般の誤用を載せている辞典も多い。例えばある国語辞典では、「水が蒸発してできた気体。また、一般には、これが空気中で凝結して水の細かい粒となったもの（湯気）のこともいう。」と書き、湯気のこと水蒸気という説明している。また、水蒸気の「飽和」については、空気の「収容力」の限界というイメージで捉えている学生が多い。理科の教科書の多くがこのように飽和を説明していることにもよると思われるが正しい理解ではない。このことは米国でも同じようである。だいぶ以前に山元龍三郎先生より、「暖かい空気は冷たい空気より多くの水蒸気を含むことができる」という空論を批判している人(Bohren氏)がいる

ことを教えていただいた。「飽和」という言葉から、このような間違った説明は、広く流布していると思われる。なお、Bohren氏は雑誌に連載した気象学に関する簡単な実験をまとめた本を書いている(住 明正訳「ビールびんの中の雲」,丸善,1990年)。「飽和」の話はこの本にも載っている。

「飽和」とはどのように理解されるべきであろうか。水を閉じた容器に入れたとき、水の表面から水分子が空間に飛び出して、容器内の空間に水分子が次第に増えていく。空間を飛び回る水分子の中には再び水面に飛び込むものもある。一定の時間に水面から飛び出す水分子の数が水面に飛び込む水分子の数より多い間は、水は減少し、空間の水分子は増加する。すなわち蒸発が続く。やがて水面から飛び出す水分子の数と水面に飛び込む水分子の数が同じになったとき、空間に存在する水分子の数は一定となる。このときの水蒸気分圧を飽和水蒸気圧という。飽和水蒸気圧は温度のみによって決まり、容器が最初、真空であったとしても、また他の気体が存在していても、その値はほとんど変わらない。厳密には、大気の圧力が加わると飽和水蒸気圧はきわめてわずかながら増加する。しかしながら、通常は無視できるので飽和水蒸気圧は温度のみによって決まると説明される。

水蒸気を含むのは空間であって空気ではない。このことは物理学的には自明のことである。しかしながら、このことを明確に意識しないと、「空気が含むことのできる水蒸気量」というような誤った説明を生じやすい。このことについて、Bohren氏は「飽和水蒸気圧」よりも平衡水蒸気圧の方が言葉としてよいだろう。なぜならば「飽和」という言葉は間違っただけでスポンジのイメージを引き出してしまおうといっている。空気中では水蒸気は窒素や酸素と共存しているのであって、収容したり、されたりという関係ではない。

* On the Conceptions of 'Water Vapor Saturation': Does the air hold water vapor?

** Yukihiro MORI, 香川大学教育学部地学教室.

© 2002 日本気象学会

「飽和」の概念について、気象学教科書での扱い、学校教科書での扱い、大学生の理解という点から見てみよう。

2. 気象学の教科書の扱い

日本の気象学の教科書で「飽和」はどのように説明されているだろうか。古典的な教科書で見てみる。

容器の中に水を入れて放置しておくとき、容器中の空間部は水蒸気で満たされる。このとき水温と空気の温度は等しいのであるが、空間部の水蒸気圧はこの温度のみによってきまり、これを飽和水蒸気圧という。(正野重方：気象学総論，1958)

空間がこの温度によってきまった最大限の水蒸気を含んだ時に飽和したといい、その時の水蒸気圧を飽和水蒸気圧という。(山本義一：新版気象学概論，1976)

この例のように、物理学を踏まえて書かれている気象学の教科書では、当然のことながら「空気」と「空間」は正確に区別されて記述されている。

最近の教科書についてみると、『一般気象学』(小倉義光，初版1984，第2版1999)では分子論的な立場で詳しい説明がなされている。山本先生の『新版気象学概論』の後続を意識して書かれている『基礎大気科学』(安田延壽，1994)では「水蒸気を酸素や窒素と同様に、混合気体である湿潤空気(現実の空気)の構成気体と見なしたときの分圧が水蒸気圧である。水蒸気が自由水面(平面水面)と平衡状態にあるときの水蒸気圧を飽和水蒸気圧という。」と書かれている。なお、同じく山本先生の後続を自認している『基礎気象学』(浅井富雄ほか，2000)では「飽和」は既知のこととして扱われており、「飽和」についての説明がないのは残念なことである。『新教養の気象学』(気象学会編，1998)でも「飽和」は既知のこととして扱われている。

3. 中学校・高等学校教科書の記述

3.1 飽和の説明

理科の教科書で「飽和」についてどのように説明されているか見てみよう。高等学校の理科のカリキュラムが変わり、以前の「地学」から、現在は「地学ⅠA」「地学ⅠB」「地学Ⅱ」となった。「地学」の時代の教科書「改訂地学」は7社から出版されていた。「飽和」は

既習のこととして、3社の教科書では説明がなかった。残りの4社のうち、2社のものは「大気を含む水蒸気量」、「(しめったふきんとぬれた皿との関係のように)、空気も吸収できる水蒸気量に限りがある。」と説明していた。その他の2社のものは正確に説明されていて、「一定容積の中に含まれる水蒸気量は限りがある。」、「限界の水蒸気密度を飽和水蒸気密度という。」というように記載されていた。

現行の地学教科書は「地学ⅠA」が2社、「地学ⅠB」が5社、「地学Ⅱ」が3社から出版されている。「飽和」についての説明があるのは「地学ⅠB」が2社、「地学Ⅱ」が1社であった。このうち2社は「空気(大気、空気塊)が含むことのできる最大水蒸気量」と説明し、1社は、蒸発の面から「水面と接する空気中に、それ以上に水面から蒸発がおこらないとき、水蒸気は飽和しているという。」と説明している。

次に中学校「理科2分野」の教科書における説明を見てみよう。5社から出版されているが、ほとんど「空気がふくむ水蒸気量」という表現が用いられている。その例を次に示す。

空気がふくむことのできる水蒸気量は限度があり、 1m^3 の空気中にふくむことのできる最大の水蒸気量を飽和水蒸気量という。

飽和水蒸気を説明する際に、「空気」を主語にして、「空気が水蒸気を含む」という表現がしばしばなされるのは、「飽和」とは、「最大限度まで満たされた状態にあること」として一般に理解されており、「空気」が「水蒸気」を収容することのできる限界として説明しようとしていることによると思われる。これは、Bohren氏が批判しているスポンジのイメージと共通である。すなわち、「飽和とは、スポンジが限度まで水をふくんだ状態のように、空気が限度まで水蒸気をふくんだ状態」として説明されることになる。

空気は窒素と酸素を主成分とする混合気体であり、水蒸気も空気を構成する成分の1つである。水蒸気を除いた空気を考える必要がある場合、気象学では、そのような空気のことを「乾燥空気」と呼んでいる。一方、理科の教科書などで、飽和水蒸気を説明する際には「乾燥空気」の意味で「空気」という言葉が用いられている。「空気が水蒸気を含む」とは、気体(窒素と酸素)が別の気体(水蒸気)を含むということになり、論理性を欠く表現となる。空気中の気体成分は互いに

共存しているのであり、水蒸気を含んでいるのは「空気」ではなくて「空間」である。

3.2 水蒸気の量の表現

一定の容積の空間に含まれる水蒸気の質量を表す学術用語として「水蒸気密度」および「絶対湿度」が用いられる。空気中の水蒸気量を表す術語として、理科教育の分野では、水蒸気密度と同じ意味で水蒸気量という言葉が用いられている。物理学上の術語としては水蒸気密度が一般性を持つと考えられる。例えば「水蒸気」の項で『理化学辞典（第3版）』では「…各温度での飽和水蒸気圧および密度を…」、『世界大百科事典』では「一定体積の空間が含むうる水蒸気量（水蒸気密度）には限界があり、…」というように、「密度」という言葉が用いられている。しかしながら、文部省の『学術用語集（気象学編）』には水蒸気密度の項目はなく、水蒸気量の項目がある。この学術用語集では水蒸気量の英訳として vapour content を当てているが、以下に述べる英語の気象学辞典にはこの言葉は見あたらない。

米国気象学会発行の『Glossary of Meteorology』の旧版（1959）では vapor concentration（水蒸気濃度）および vapor density（水蒸気密度）の項では「absolute humidity（絶対湿度）と同じ」とだけ書かれており、説明は「絶対湿度」の項に出ている。2000年に出版された第2版では、この関係が逆転し、「絶対湿度」の項では「水蒸気密度と同じ」と書かれ、説明は「水蒸気密度」の項に与えられ、「水蒸気密度は混合気体によって占められている容積に対する水蒸気の質量の比、すなわち水蒸気成分の密度である。この量は断熱膨張・圧縮に関して保存量でないので気象学者は通常用いない」と書かれている。

一方、英国気象局の『Meteorological Glossary』（第5版、1972）では absolute humidity（絶対湿度）や vapour density（水蒸気密度）の項には vapour concentration（水蒸気濃度）の代替と書かれている。水蒸気濃度の項では水蒸気の密度として説明されていて、この量の代わりに用いられる絶対湿度や水蒸気密度は今では好まれないと書かれている。

したがって、一定容積中の水蒸気の質量を表すのに、同じ内容であるにもかかわらず、「水蒸気量」（米英では「水蒸気濃度」）、「水蒸気密度」、「絶対湿度」の3通りの用語が用いられており、統一した見解はない。

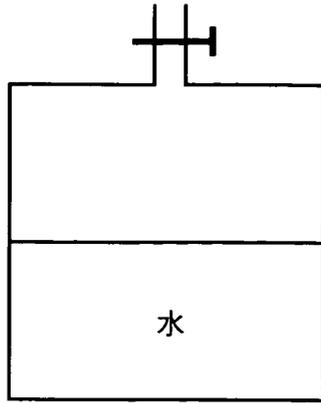
『気象科学事典』（日本気象学会編、1998）では「絶対湿度」・「水蒸気密度」の項目はなく、これらは「湿

度」や「水蒸気量」の項目でも触れられていない。「湿度計」の項目で湿度計の分類の説明で「絶対湿度を測るものがある」と述べられているが内容についての説明はない。「水蒸気量」については「大気中に存在する水蒸気を量的に表現したものである。水蒸気量の表し方として、水蒸気圧、比湿、混合比などがある」と説明されている。ここで「比湿」とは、湿潤空気1kg中に含まれる水蒸気の質量をいい、「混合比」とは、乾燥空気1kgと共存している水蒸気の質量をいう。

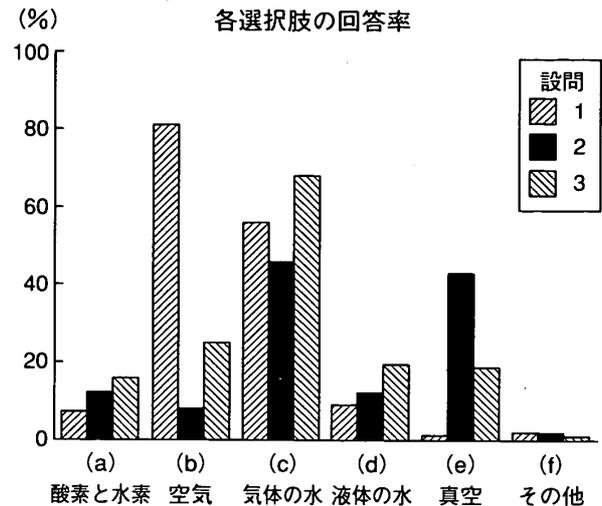
このように水蒸気量の表し方には、いくつかあるので、量の表し方としての「水蒸気量」は、学術用語としては一般に用いられていない。しかしながら、「密度」や「絶対」という言葉を用いることなく湿度を表すことができるためか、中学校や高等学校の理科の教科書では「水蒸気密度」の意味で用いられている。

「水蒸気量」は『文部省学術用語集（気象学編）』にも取り上げられている用語である。しかしながら、気象学に関する辞典類ではこれまで一つの項目として扱われてこなかった。『気象科学事典』では一つの項目としているが、先に述べたように水蒸気の「表し方」としては説明していない。水蒸気の「表し方」としての「水蒸気量」は、学術上では一般に用いられない用語であり、理科教育の分野で、生徒の認識の発展段階を考慮して用いられる教育上の用語として理解する必要がある。

『新版気象学概論』（山本義一、1976）では、湿度のいろいろな表し方を述べた後で、「最後に、水蒸気の密度そのものも湿度の一つの表し方とみなすことができる。この意味でこれを絶対湿度ということもあることを付言する。」と述べている。「水蒸気密度」と「絶対湿度」を比べると、これまで「絶対湿度」の方が一般的に用いられているように思われる。「水蒸気密度」を用いている少ない例としては『気象の理』（島貫陸、1980）がある。最近では『一般気象学』（小倉義光）では「絶対湿度」を用いず、「水蒸気密度」を用いているので、印象に残った。昨年日本気象学会春季大会の折に小倉先生に、なぜ絶対湿度ではなく水蒸気密度を用いているのか、お尋ねしたところ「単位体積あたりの物質の質量を表す物理量は密度だから、水蒸気密度を用いた」といわれた。「絶対湿度」を意識的に避けて「水蒸気密度」を用いたというより、物理学の用語として自然に用いているので、質問に当惑されているような印象であった。一定容積中における水蒸気量の表し方としては、「水蒸気密度」が物理学的に明快である



第1図 設問で想定した
コック付の容器。



第2図 各設問における個々の選択肢の回答率
(谷山・森, 2001;「地学教育」, 第54巻,
pp. 1-9).

と考えられる。

4. 大学生の飽和に関する理解の調査

高等学校までの教育を受けてきた学生が水蒸気の飽和についてどのような理解を持っているか見てみよう。

ここでは第1図に示すコック付きの容器を用いて、下半分に水があるとき、上半分の空間には何があるか問う思考実験について、ある大学の一般の学生を対象にしたアンケート調査の結果を紹介する。

アンケートの設問では、水蒸気で飽和した空間を作るために次の三種の過程を設定し、それぞれについて、「容器の上半分の空間には何があると思いますか」という問いを設けた。

- 設問1 容器の内部を乾燥した空気で満たし、次に水の中に注入してコックを閉じ放置した。
- 設問2 容器の内部を真空にして、次に水を容器の中に注入してコックを閉じ放置した。
- 設問3 容器の内部をすべて水で満たし、下から熱を加えて中の水を沸騰させた。内部の水が半分ほどに減ったところでコックを閉じて室温まで冷やした。

このような状況を設定した目的は、「空気が水蒸気を含む」と考えるならば、容器の中の空間が真空である場合の判定を問うことである。

回答は語句の選択式で各設問共通に、(a) 水が分解してできた酸素と水素、(b) 空気、(c) 気体の水、(d) 液体の水、(e) 真空、(f) その他の6つを選択肢としてあげた。

水蒸気の代わりに「気体の水」の語句を用いたのは、回答者が湯気を意味する語句として誤用することを避

けるためである。

設問1, 2, 3の各選択肢の回答率(%)を第2図に示す。各設問においては、6つの選択肢のうちから正答と思うものをすべてあげるように指示しているので、それぞれの設問についての回答は、いくつかの選択肢の組み合わせとなる。

設問1で「空気」の回答率は81%、「気体の水」の回答率は56%であるが、正答となる両者の組み合わせの回答率は34%となる。設問2で「気体の水」の回答率は46%であるが、「気体の水」のみの回答率は30%となる。設問3で「気体の水」の回答率は68%であるが、「気体の水」のみの回答率は34%となる。このように、組み合わせの回答でみた場合、正答率は30~35%と低下する。全問の正答率は10%であった。各設問で特に多い誤答は、設問1で「空気」のみの回答、設問2で「真空」のみの回答であるが、設問3では誤答が分散している。

このことは、水蒸気に関して何らかの概念で事象を統一的に解釈している回答が少なく、各設問の状況に応じて回答していることを示している。そこで、各設問で選択した個々の語句の組み合わせから、「空気と水の気体は共存する」と考えている割合を推測してみると43%となった。半数以上の者については、野外の大気中に水蒸気が存在するという知識が一般的な水蒸気理解までは至っておらず、空気で満たされた密閉した空間では水は蒸発しないと回答している。しかし、設問1~3何れかで「気体の水」を選択している回答は84%あり、今回の回答者の半数は密閉した空間に水

蒸気が存在することを否定しているのではなく、水と接する空間があっても水蒸気の存在はその場の条件に左右されると考えている。

4. まとめ

水蒸気の「飽和」概念は中学校の「理科」で導入される。その際、ほとんどの教科書で、「空気が含むうる水蒸気には限度がある」と説明されている。

大気中で経験される温度は、窒素や酸素に対しては沸点以上であり、水蒸気に対しては、対流圏では沸点以下であるので、これらの大気成分のうち、相変化する気体は水蒸気のみである。また、大気中の一定容積には空気が存在しているので、「空気が含むうる水蒸気には限度がある」と考えて、霧や雲の発生などの大気現象を説明することは容易である。しかし、種々の現象を統一的に説明できる水蒸気概念にはなりにくい。大学生でも、「水蒸気」について科学的な理解を持っている者は少ない。

水蒸気の「飽和」概念の理解を進めるために、「空気」

を「空間」に置き換える必要がある。さらに「飽和」の現象は相平衡の考え方を基礎にして、理解することが必要である。このことによって、水の蒸発や凝結の現象を空気の関係しない水蒸気と水だけの関係として捉えることができる。

ただし、水蒸気が含まれている「空間」には「空気」が存在しているので、一般的な説明のために「空間」を意味して「空気」といっても問題はないが、「飽和」概念を説明する際には、スponジのイメージになってしまうような説明は避けるべきであろう。

一定の容積の空間に含まれる水蒸気の量を表す学術用語として「水蒸気密度」、「絶対湿度」、「水蒸気量」という言葉が用いられている。同じ内容の物理量が3つの用語で表現されているが、物理学の観点からは、「水蒸気密度」で統一されるのが望ましいのではないかと考えられる。なお、「密度」は、中学校理科の学習指導要領に取り上げられている物理学の概念であり、中学校以上の理科教育に「水蒸気密度」を用いても問題はないと思われる。



第43回科学技術映像祭入選作品発表会

年間の優秀科学映像を決める科学技術映像祭の入選作品を一挙上映。今回、高知大学の研究者らが製作した『深海3572メートルに生きる』が最高賞を授賞した。これは、海洋科学技術センターが室戸沖南海トラフに設置した海底地震総合観測システムを利用し、深海生物を4年間観察・記録したもの。他に、北海道富良野市にある東京大学北海道演習林を舞台に木材を生産しながら原始の森を維持する“林分施業法”の仕組みを紹介した『日本で一番美しい森』（北海道放送）などが文部科学大臣賞を授賞している。

日 程：4月18日（木）・19日（金）（入場無料）

会 場：科学技術館・サイエンスホール
（千代田区北の丸公園2-1）

交 通：地下鉄竹橋駅・九段下駅徒歩7分

問合せ先：日本科学技術振興財団・振興部

Tel. : 03-3212-2454

<http://ppd.jsf.or.jp/shinko/pro/s-m/index.htm>