

## 「気体性」の教育について

——理科系授業の反省資料として——

小林 茂 広 大 塚 利 恵 子

### 1. まえおき

理科教育における概念形成に関する研究着手の第一歩として、本学部学生の粒子性概念の習得状況の調査を行なってみた。その結果は現在印刷中（学部研究報告Ⅱ）であるが、概略を述べると、粒子性概念の形成どころか、事実・現象・法則を關係的・構造的・体系的に捉えてなく、探究過程を通して科学の方法を習得する訓練すらできているとは思えない状態である。調査の対象とした学生は、本年の理科教材研究の受講者（77名）であって、調査事項はすべて中学校・高等学校で既に学習済みのはずのものばかりであった。ありえないことではあるが、たとえ、高校で化学や物理を選択、学習しなかったとしても、義務教育を担当する教員を志望する以上は、大学の自然系列の一般教養として進んで物理や化学を受講したはずである。それにもかかわらず、前述のような状況である。そこで、どんな教育のしかたをすれば効果があがるものか、それを知る資料を得るため、同じ学生に対して、あらためて「気体性」についてのテストと再教育を調査も含めて10回（毎回50分程度）くりかえしてみた。その調査結果の一部を述べ、今後、行なうべき教育、それは一般教育についても、専門教育についても、また、理科系であろうと、文科系であろうと、すべての教育のしかた、あり方を考えなおすための参考資料としたい。

なお、このような状況は、わが学部のみの特有な現象とは思われず、どこの大学でも、学部でもほぼ同じ傾向でないかと考え、今迄に聞いていた中学校・高等学校におけるお客様教育が大学にまで押し寄せてきた感じである。義務教育を担当する教員の養成と一般教育をも受け持っている本学部では、この状況を充分認識して万全の策を立てるべきでないかと思ひ、報告する次第である。

## 2. 気体の体積

最初の2回の調査で粒子性の概念も知識も身につけているとは思えなかったので、3回目のテストの10問の中に、ほとんどの学生ができるに違いないと思えた気化の問題と、不注意な失敗をする学生もかなりいるものと予想される気体の温度による体積膨脹の問題とをいれておいた。気化の問題とは

「水 ( $\text{H}_2\text{O}$ ) の1cc は約1gである。これを気化して水蒸気にすると約( )倍位の体積膨脹をするのか。ただし、計算の便宜上、標準状態 ( $0^\circ\text{C}$ , 1気圧) で求めてよい。」

であり、体積の熱膨脹の問題は

「1gの水蒸気の圧力を一定に保ちながら、温度を $100^\circ\text{C}$ から $500^\circ\text{C}$ まで上げると体積は約( )倍になるか。」

であって、( )の中には、これら以外の他の問題とも共通にして次の数字

$$1, 2, 3, \dots; \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots$$

$$\sqrt{2}, \sqrt{3}, \dots; \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \dots$$

の中から適当なものを選んで入れさせた。

気化の問題では、一般に、液体が気体になると約千倍の体積膨脹を知っている、計算もせず約1,000倍と答えるか、あるいは標準状態の1モルの気体の体積22.4lを水の分子量18gで割って1,244倍と正確な数字で答えるだろうと思っていた。しかし、予想に反して、1,000と答えた者は1人もいなく、書き違えたためか、水が百度で沸騰することから思いついたのか100と答えた人が1名いた。そして正解者は2名(3%)のみで、22,400と22,000の答が1つずつ。わからないと疑問詞?をいれた者が20名(27%)、体積は変わらない、あるいは、却って小さくなると非常識な答をした者あわせて13名(18%)には驚いた。また、根号の答( $\sqrt{2}$ 他; 6名, 8%)と数倍ないし数拾倍とした26名(36%)とあとは133と273の答がそれぞれ1つと2つあった。

体積の熱膨脹の問題では、摂氏で5倍の温度上昇のため(絶対温度に換算することなく直ちに)5と答えた38名(52%),  $1/5$ ; 3名(4%), ?; 11名(15%)で、正解である約2倍とした者は8名(11%)のみ、 $\sqrt{2}$ 倍が3名(4

%)、変わらぬ6名(8%)、あとは数倍から拾数倍が4名(5%)いた。

テストを終えてから行なった講評と説明では、標準状態(0°C, 1気圧)における1モル、すなわち水蒸気18gの体積は22.4lであるから、気化の問題では割算 $22,400 \div 18$ を行なって1,000倍あまりの答を出すべきであると教えた。また、熱膨脹の問題では摂氏の度数のままではなく、絶対温度つまり摂氏の温度に273を加えた温度数を使用すべきで、これは気体計算には是非必要と注意した。学生たちは真妙に聞いていて、反省の色が窺えたので、おそらく、今後2度と、この種の問題や加えた説明の基本事項を忘れてたり、間違える人はほとんどいないだろうと思った。しかし、現実にはそうでなかった。これについては後で述べる。

4回目から8回目まで理想気体の分子運動論や、原子の電子配置、分子の結合、分子の形、分子間力などから、実在気体について連続5回のテスト教育を行なったうえ、9回目で論文式テスト

「理想気体とはどんなものか、箇条書きに列挙せよ。」

を行ない、自発的に書かせてみた。最高6項目、最低1項目で、平均して2.5項目しか挙げられないことがわかった。そこで、テスト10では、理想気体として列挙して欲しかったような文章の一部を空白にして掲げ、それを補足して完成させる10問を試みた。そのうち、ここに関係のある3問

「(1)標準状態にある理想気体1モルの温度は( )、圧力は( )、体積は( )である。

(2)理想気体の状態は方程式( )で表わされる。

(3)理想気体では、ボイルの法則が成立し、条件( )の下に( )と( )が( )比例する。」

について説明してみよう。

(1)の標準状態の理想気体についてテスト9で自発的に述べた学生は54名(74%)と出席学生(73名)の3/4近くであったが、条件の不備なものも含めての数字である。内訳を示すと、気体の量「1モル」を示さないで22.4lとした者18名(25%)や標準状態の完全な指定のできてない者17名(23%)を除くと、正確な表現で答えられた者は19名(26%)にすぎず、第3回から第8回のテス

トまで第5回を除いて毎回のテスト問題の中に標準状態のことが用いられていたことを思えば、そして、さらにテスト10の結果を知れば、まえおきで述べたお客様学生がいかに多いか、おわかりいただけるであろう。しかし、テスト9の結果については、学生に全然知らさず、また、注意や説明、教育を施すこともしないで1週間後前述のテスト10の文章完成問題をさせたのである。正確に補足できた者は34名(47%)で、条件の指定は不完全だが22 4 lとした者14名(19%)、また22 4 lの数字すら書いていない者が25名(34%)で、うち6名は白紙であった。なお、テスト9と10を比較して、不完全表現あるいは答として挙げられなかった学生で文章完成ならできる者が26名(36%)おり、逆に、完全表現できた人で正しく空白を埋められなかった例が1人いる。

(2)理想気体の状態方程式  $PV=nRT$  についてはテスト9の自発的解答者18名(25%)に対しテスト10では70名というほとんどすべての人(96%)が正しく式を書いている。しかし、本当の意味、つまり、理想気体の圧力( $P$ )、体積( $V$ )、量(モル数  $n$ )、絶対温度( $T$ )の4つの変量の間気体定数( $R$ )で結ばれる一つの関係式が成立すると正しく理解し、応用できる人が少ないことは、次のボイルの法則の問題解答にはっきり示されている。

(3)ボイルの法則とは「一定量、一定温度の理想気体の圧力と体積が反比例することである」。これは状態方程式の右辺の変量  $n$  と  $T$  を一定にすることであるから、 $PV=一定$ となり、圧力と体積が反比例することを示す式に他ならない。多くの学生(48名, 66%)が温度条件は記入していたが、濃度条件(一定量あるいは一定モル数)の指定を忘れていた。2条件とも書いた正解者はわずか4名(5%)で、なかには圧力(11名, 15%)、体積(5名, 7%)、標準状態(2名, 3%)を条件にした者すらいた。また、一定圧力の条件で体積と温度が正比例するとした者(前記の11名)のうち絶対温度と明記したものはただ1人であった(なお、これはボイルの法則ではなく、シャルルの法則である)。これらの失敗者の多くは、第3回のテスト後の講評のさい恥じいり、反省していたはずなのに、1ヶ月あまりたてばすっかり忘れてしまうのであろうか。

### 3. 気体の圧力

第4, 第5回は1モルの気体分子数, 分子速度, 原子の電子配置, 元素の周期律, 分子の結合と形, 分子間力について簡単な授業とテストを行ない, そのあと第6回目のテストで混合気体の圧力の問題を試みさせた。テスト3に続いてすぐ, 気体の圧力テストを行なわなかった理由は, テスト3の気体の体積に関する前述の2問や気体の断熱圧縮の問題解答成績が芳しくなかったため, それについての解説や教育を施した。そして, すぐ, そのあとでテストするより, 少し間をおくことが望ましく思われたからである。混合気体の圧力問題は「中央にしきりをいれて二等分した容器がある。

(1)その一方を真空にし, 他方に理想気体をいれてから, しきりをとるとき気体の圧力はどうなるか。次の中から答を選び, 選んだ理由も書け。

高くなる 低くなる 変りなし ?

(2)一方に $0^{\circ}\text{C}$ , 1 atm の酸素を, 他方に $0^{\circ}\text{C}$ , 2 atm の窒素をいれてから, しきりをとるとき圧力は何 atm になるか。次の中から答を選び, 選んだ理由も書け。(単位は atm)

1 1.5 2 3 その他 ?

(3)一方に標準状態の $\text{O}_2$ を, 他方に $273^{\circ}\text{C}$ , 2 気圧の $\text{O}_2$ をいれてから, しきりをとるとき圧力は何気圧になるか。次の中から答を選び, 選んだ理由も書け。(単位は気圧)

1 1.25 1.5 1.75 2 その他 ?

であって, 実際には圧力だけでなく, 温度や分子速度などについても質問しているが, 関係するところで述べることにして, ここでは省略してある。

解答結果を第1表に示す。正解とは, 正しい理由まで書けたもの, 準正解は後述するように完全には正しいといえない理由をつけて正しい選択肢を選んだ

第1表 「気体の圧力」テストの解答分布

問 題	正 解	準 正 解	正 選 択	誤 選 択	無 答
(1)	24%	32%	28%	16%	0%
(2)	6	24	34	34	2
(3)	2	22	30	38	8

もの、正選択は理由を間違えているものである。選択理由を書かさないう普通の○×式テストであれば正答率は(1)84%、(2)64%、(3)54%となり、まづまづの成績のように見える。しかし、ここに○×式テストの欠陥が如実に示されているのであって、学力増進のためには、たとえ、より多くの解答時間や採点時間がかかろうとも、学生に選択理由まで書かせて、教師は指導しなければならない。

学生に対して行なった講評の概略を述べると、(1)は理想気体であって分子間力ゼロであるため真空膨脹に気体のエネルギー消費はなく、気体量一定の等温膨脹であるから、圧力は半減すると正しい考察をすることが必要であり、(2)と(3)では、常温常圧で気体状態の酸素と窒素は（同じテスト6の他の問題として出題してあり、これについては5実在気体で説明する）どちらも分子間力は小さく、当問題では理想気体とみなして差支えないことに気付いたうえで分圧の法則を用い、ともに1.5気圧を答とすべきであると説明した。そして、1.5の数字の算出は、準正解とした学生のすべてがしたように、1気圧と2気圧の平均として出すべきではなく、体積の2倍膨脹により、それぞれの分圧が0.5気圧と1気圧となり、その和を求めて1.5とするのが正しいのだと注意し、数学的には足して2で割るのも、2で割ってから足すのも同じであるが、物理的には意味のちがうことを、大学の授業としては懇切丁寧すぎるほど十分な注意を与えたつもりである。

テスト8では、本年（昭和50年）11月に高校生を対象として行なわれた国立大学共通第1次試験実地研究試験問題のうちの物理の一つの問題

「注射器に体積 $12\text{cm}^3$ の空気を閉じこめ、断面積 $2\text{cm}^2$ のピストンに $2\text{kg}$ 重のおもりを静かにのせて空気の体積を圧縮して $6\text{cm}^3$ とするとき、注射器内の空気の圧力は何倍に高まるか。」

をやらせてみた。中学生でも、できない人はいないだろうと思ったのに、解答学生72名中3人（4%）も間違えていた。2人は $\frac{1}{2}$ と答え、あとの1人は4であった。

テスト9に、第6テストの直後に与えた分圧の注意を思い出せば容易に正解できるはずの問題

「2 l のフラスコに20°C, 70cmHg の窒素がある。これに同温で100 cmHg の酸素のはいった3 l フラスコを接続して, 気体の温度を変えずに完全に混合すれば, 圧力はいくらになるか。」

を出題し, どれほどテスト直後の教育の効果があるものか調査することにした。結果はさんざんであった。すなわち, 正答 ( $70 \times \frac{2}{5} + 100 \times \frac{3}{5} = 88 \text{cmHg}$ ) は半数に達しない42%, 正答できなかったが分圧を考えていた者は4%で, 誤答46%と無答8%であった。なお, 分圧計算が正しく行えるようになったものは40%で, 分圧計算の正しい理解がまだできていない者が58%もいて, テスト直後の分圧に関する教育に対し過半数の学生がお客様であったことがわかり愕然としている。

#### 4. 気体分子運動論

最初の2回の調査テストより, 学生は物質における分子運動の知識を持っているが, 正確でないことを知り, 続いて2回のテスト教育によって気体分子運動論の簡単な再教育を行なった。そして, 6回目より以下のようなテストと教育をくりかえした。

テスト6は, 前述の中央にしきりをいれた容器の中で混合する気体の分子の速さを問うたのであるが, 正しい選択肢を選んだ人が18%で, しかも, その選択理由の正しかった人は1人もいなかったことに驚き, 講評では再び「理想気体分子の平均運動エネルギー ( $\frac{1}{2}mv^2$ ) は気体の絶対温度 ( $T$ ) に比例し, 平均速度 ( $v$ ) は  $\sqrt{T/m}$  に比例する」ことを忘れないようにと注意した。そして, 続いてのテスト7において, 分子の熱運動の問題

「一定容器内の理想気体の温度を絶対温度で2倍にあげるとき, 次の諸量は何倍になるか, 下の数字の中から正しいと思うものを選べ。

1  $\sqrt{2}$  2 4  $\frac{1}{\sqrt{2}}$   $\frac{1}{2}$   $\frac{1}{4}$  その他 ?

- (1) 気体分子の平均運動エネルギー
- (2) 気体分子の平均速度
- (3) 気体分子の容器壁に衝突する毎秒の回数

と文章の正誤を判定する問題 (誤りは訂正)

「(1)気体分子の平均の速さは絶対温度に比例し、分子量に反比例する。

(2)空気中の酸素分子も窒素分子も平均では同じ速さをもっている。

(3)ゴム風船は、空気であくませたものより水素をつめたものの方がはやくしぼむ。そのわけは、ゴム膜には小さな分子（水素だけでなく、窒素、酸素や二酸化炭素でも）を通すことのできる穴があり、軽い水素分子は空気中の窒素や酸素分子より2、3倍もはやく運動しているからである。」

の解答を求めた。

熱運動の問題の解答分布は第2表に示されていて、運動エネルギー、速度、

第2表 熱運動問題の解答分布

問 題	正 解	正 答	誤 答	無 答
(1)	2倍	68%	29%	3%
(2)	$\sqrt{2}$ 倍	54	48	3
(3)	$\sqrt{2}$ 倍	29	64	7

衝突回数順に正答率は減り、誤答率がふえている。

文章正誤の問題に対しては、第3表が得られた。これらの表はテスト教育の

第3表 正誤判定問題の解答分布

問 題	正誤判定	正 答	誤 答	無 答
(1)	$\times (v_m \propto \sqrt{T/m})$	47%	50%	3%
(2)	$\times (v_{N_2} > v_{O_2})$	56	36	8
(3)	○	56	30	14

効果がいくらか挙がっていることを示している。ここで、われわれが実施しているテスト教育について説明しておく。あらかじめ、比較的簡単な問題についてのテストを行ない、学生自身に考慮、解答を要求する。その解答（いわば、学生のたてた仮説）について正誤の講評をし、説明を加え、さらに、より難しい問題へと進める教育のしかたで、いわば、仮説検証式授業ともいべきものを実験的、研究的に試みているのである。

さて、第2表の問題(3)、すなわち、器壁に対する分子の衝突回数のできがよくないので、テスト8では、先にも引用した大学共通の注射器内の空気の問題のつづき

「ピストンの断面積が  $2 \text{ cm}^2$  の注射器に空気を入れ、ゴムせんをして、水のはいったビーカー中に立てた。この注射器に図の A ~ D の順に、おもりをのせたり、熱を加えたりすると、注射器内の空気の体積が図に示したように変化した。

状態の記号	A	B	C	D
状態	水のはいったビーカー中に立てたとき	2 kg 重のおもりをせずかにのせたとき	2 kg 重のおもりをのせたまま温度を上げたとき	C と温度を変えずにおもりをふやしたとき
注射器内の空気の体積	$12 \text{ cm}^3$	$6 \text{ cm}^3$	$7 \text{ cm}^3$	$6 \text{ cm}^3$

次の文の [                      ] から正しいものを選び、記号を○で囲め。

- ① 状態 B では、状態 A とくらべて、注射器内の空気の分子の速さは [ ア. 増しており イ. 減っており ウ. 変わらず ]、分子が 1 秒間にピストンに衝突する回数は [ エ. 増している オ. 減っている カ. 変わらない ]。
- ② 状態 D では、状態 B とくらべて、注射器内の空気の分子の速さは [ ア. 増しており イ. 減っており ウ. 変わらず ]、分子が 1 秒間にピストンに衝突する回数は [ エ. 増している オ. 減っている カ. 変わらない ]。

を考えさせた。学生の示した解答は(1)ウエ(2)アエ、すなわち(1)分子の速さは変わらないが、(2)分子の速さが増しても、ともに衝突回数は増加するという正解が一番多くて29名(40%)、つづいて誤答のアエアエ10名(14%)、アエウカ9名(13%)、ウエアカ、イエウカ各5名(7%)、ウカアエ4名(6%)イオウカ、イオアエ各2名(3%)、イオアオ、ウエウエ、ウエウカ、アエウエ各1

名(1%)と無答2名(3%)であった。高校生用の問題で、別に難しいものではなく、(1)は等温圧縮、(2)は加熱圧縮(定積)と思いつけば誤答するはずのないものである。

衝突回数については、テスト教育を通しての簡単な教育では効果が少ないように思えるので、理想気体の圧力計算の本格的な講義を行なうことにきめたが、その前に、テスト9で圧力増加の条件を問う問題に対する学生の考え方の態度を調べておくことにした。

「気体の圧力増加に関する、つぎの各問を分子論的に簡単明瞭に説明せよ。

(1)一定量、一定体積の気体の温度をあげると圧力の増すわけ

(2)一定量、一定温度の気体の体積を減らすと圧力の増すわけ

(3)一定体積、一定温度の気体の量をふやすと圧力の増すわけ

(4)上記以外の方法で気体の圧力を増すことができるか。もし、あれば、その方法とわけ。」

この問題の趣旨は、巨視的(マクロ)の立場では $PV=nRT$ を用いて簡単に説明できることを、微視的(ミクロ)の立場から説明を求め、分子運動論の基礎的考慮ができるか、どうかをみようとするのである。求めた解答は

(1)温度上昇のため、一定体積内の一定数の気体分子の平均運動エネルギー、したがって平均速度が増加して、分子が器壁に衝突して与える力(運動量の変化)と1秒あたりの衝突の回数の両者の増加のために圧力が増加する。

(2)定量、定温のため分子数も分子速度も変わらないが、体積減少により分子の運動範囲がせまくなるので、各分子が器壁に衝突する1秒あたりの回数が増加するため

(3)一定体積内の気体量、つまり分子数を増せば、1個の分子(速度は同じ)が器壁に与える力は変わらないが、1秒あたりの衝突する分子の個数が増加するため

(4)以上のように、気体の圧力に関係する3量(分子数、分子の運動範囲、分子速度)のうち2量を固定して1量のみの変化による圧力の増加の問題であるから、これらの3方法以外に圧力を増すことはできない。

これが求めた解答であるのに対し、学生から得られた実際の解答は

(1)上に示したように、1回の衝突で与える力(運動量)と毎秒の衝突回数との増加としないで、どちらか一方のみしか答えず、しかも、あいまいな不正確な表現であって、運動エネルギーの増加のため30名(42%)、運動エネルギーの増加による分子の衝突回数の増加のため15名(21%)、速度の増加のため3名(4%)、速度増加による衝突回数増加のため15名(21%)、速度増加による運動量増加のため3名(4%)、見当はずれやマクロ的答5名(7%)、無答1名(1%)であった。

(2)分子の運動範囲、あるいは距離の縮小による器壁との衝突回数増加のため45名(62%)の正解以外は、すべて誤答(分子数密度、分子速度、運動エネルギーの増加のためや、マクロ的答)25名(35%)と無答2名(3%)であった。

(3)分子数増加のため17名(23%)、分子増加による衝突回数増加のため33名(46%)と誤答(密度増加、他)20名(28%)と無答2名(3%)。

(4)正解である「できない」と無答がおのおの24名(33%)、同時に2量の変化をさせればよい8名(11%)、誤答(モル数を増加させるなど)16名(23%)。

テスト9では、前述のように、理想気体とはどんなものか簡条書きさせたのであるが、分子運動論的項目を挙げたのは25人に1人位の割合であった。

最終の第10回になったが、前述のように、理想気体の圧力を分子運動論的に求める講義を用意したプリントを用いて短時間に行なった。しかし、学生の質問にはすべて答え、わからないところのないようにした。そして、そのあと直ちにテスト10にうつり、理想気体の文章を完成させる問題(前出のつづき)

「理想気体の分子は

- (1)完全( )球であって、衝突しても( )が全然失なわれない。
- (2)分子間には( )が作用せず、分子は衝突時以外は( )する。
- (3)質量は( )が、( )はない。
- (4)平均速度は( )によって異なるが、( )に比例する。
- (5)平均運動エネルギーは( )によらず、( )にのみ比例して変わる。

をさせたのである。講義のプリントを見て、答案を書くことは許したのであるが、やはり成績は良くなかった。解答状況を簡単に述べると

(1)「弾性」と「エネルギー」のことばをいれると正解であるが、第4表のような結果であって、笑いもできないようなことば、たとえば無欠、独立、均衡、電子など迷案、珍案が数多くあったことは(2)以下についても同じである。

第4表 補足問題の解答分布

問題	正 解	正 答	誤 答	無 答	正 解
(1)	弾性	人(%) 10(14)	人(%) 37(51)	人(%) 26(36)	人(%) 5 (7)
	(運動)エネルギー	38(52)	33(45)	2 (3)	
(2)	(分子間引)力	66(90)	5 (7)	2 (3)	2 (3)
	(等速度)直線運動	2 (3)	49(67)	22(30)	
(3)	ある	38(52)	7(10)	28(38)	9(12)
	体積, あるいは大きさ	9(12)	26(36)	38(52)	
(4)	質量や温度	0	64(88)	9(12)	0
	$\sqrt{\text{絶対温度/質量}}$	0	65(89)	8(11)	
(5)	質量	15(21)	41(56)	17(23)	4 (5)
	絶対温度	19(26)	50(69)	4 (5)	

(4)と(5)の後半に「温度」とのみ書いていた答が非常に多かったが、「絶対温度」としてなければ、すべて誤答とした。

テスト10には、さらにもう1問

「分子量  $M$ , 温度  $T$ , 圧力  $P$ , 体積  $V$ , 分子数  $N$ , 平均速度  $u$  の2種類の気体 ( $M_1 > M_2$  で, 添数 1, 2 で区別) について

(1)  $T_1 = T_2$ ,  $P_1 = P_2$ ,  $V_1 = V_2$  ならば, ①  $N_1$  と  $N_2$ , および ②  $u_1$  と  $u_2$  の大小関係を式で書け (以下同じ)

(2)  $P_1 = P_2$ ,  $V_1 = V_2$ ,  $N_1 < N_2$  ならば  $T_1$  と  $T_2$  は

(3)  $T_1 = T_2$ ,  $N_1 = N_2$ ,  $P_1 > P_2$  ならば  $V_1$  と  $V_2$  は

出題した。

この問題に対する解答分布は第5表に示す。

第5表 大小問題の解答分布

問題	正解	>	=	<	無答
(1)	① $N_1 = N_2$	人(%) 43(59)	人(%) 7(10)	人(%) 22(30)	人(%) 1(1)
	② $u_1 < u_2$	23(31)	10(14)	38(52)	2(3)
(2)	$T_1 > T_2$	35(48)	13(18)	20(27)	4(5)
(3)	$V_1 < V_2$	16(22)	6(8)	46(63)	4(5)

## 5. 実在気体

原子と分子の構造や分子間力について簡単な授業とテストを行なった第5回のあとを受けて、テスト6では実在気体に関して、常温で気体の問題「原子番号20までの原子（学生には表を与えたが、ここには掲載省略）で、常温常圧において

- (1) 単独原子で気体であるものはなにか。
- (2) 同じ2原子からできている気体はなにか。
- (3) 閉殻の電子配置をもつ原子はなにか。
- (4) 同じ原子の電子対共有結合の分子はなにか。」

と、不活性気体についての問題

「不活性気体について

- (1) 知っているだけ多くの名前を書け。
- (2) これらのうち、常温常圧で液体であるものはどれか。
- (3) これらのうち、液化しやすいもの、すなわち沸点（すべて $0^{\circ}\text{C}$ 以下である）がもっとも高いものはどれか。
- (4) つぎの文の（ ）の中の正しいものを選び、選んだ理由も書け（問(5)についても同じ）。

沸点と原子番号との関係は、番号の大きい、重いものほど沸騰（しやすいしにくい 関係なし）。

(5) 沸点と分子間力との関係は、沸点の低いものほど分子間力は（大きい 小さい 関係なし）。

(6) 分子間力と原子番号との間には、なにか関係があるか。思いつくことがあれば、それを書け。

(7) これらのうち、理想気体にもっとも近いと思われるものはどれか。

(8)不活性気体の名称の由来を説明せよ

を出題した。

各問の正解を示すと

常温常圧で気体の問題は(1)と(3)、(2)と(4)は同じで

(1), (3) He, Ne, Ar

(2), (4) H, N, O, F, Cl

不活性気体の問題の正解は

(1) He Ne Ar Kr Xe Rn

(2) なし

(3) Rn (もしも He, Ne, Ar しか書いてない場合は Ar を正解とする)

(4) 沸騰しにくい [理由] 一般に、重いと気化しにくいから

(5) 分子間力は小さい [理由] 一般に、沸点が低いと液体になりにくく、凝縮させる分子間力が弱いから

(6) とともに大きい (あるいは、小さい)

(7) He

(8) 電子配置が閉殻構造のため、化学的に安定で、反応性が乏しいからである。

解答結果について述べると

常温気体の問題では(1)と(3)、(2)と(4)をヒントとして利用したあともなく、第6表に正答数に+、誤答数に-をつけて解答分布を示す。

(1)と(3)の正解者数が26と57であって倍以上の、しかも大きな差であることと、(2)と(4)のそれは4と1で小さく、それにしても差がありすぎることは答の数が+3, +2, +1のときにも見られる。

不活性気体の問題では

(1)原子番号の20より大きな不活性気体名も挙げて欲しかったが、実際には2割強の人にすぎず、しかも完全に6つとも書けた者は1人だけ、5つは7人で、うちの1人は「パルチオン」という奇妙な気体名?も加えていた。

(2)問題を注意して読めば(1)で不活性気体を挙げさせ、そのうちの液体はどれかと尋ねているのだから、「なし」以外の答はないはずである。しかるに、「な

第6表 「常温気体」問題の解答分布

問	答		+4		+3		+3		+3	
	+5	+5 -1	+4	+4 -1	+3	+3 -1	+3	+3 -2	+3 -3 以上	
	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)	
(1)					26(42)	2(3)	4(6)	6(10)		
(3)					57(92)	0	0	0		
(2)	4(6)	1(2)	6(10)	2(3)	9(15)	4(6)	0	1(2)		
(4)	1(2)	1(2)	3(5)	1(2)	5(8)	0	0	0		

	+2	+2 -1	+2 -2 以上	+1	+1 -1	+1 -2 以上	0 (無答)	0 -1	0 -2
	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)	人(%)
	2(3)	0	2(3)	2(3)	4(6)	8(13)	0	4(6)	6(10)
	3(5)	1(2)	0	0	0	0	1(2)	0	0
	11(18)	4(6)	2(3)	6(10)	2(3)	5(8)	6(10)	0	1(2)
	7(11)	2(3)	0	27(44)	3(5)	5(8)	7(11)	2(3)	1(2)

し」と答えたのは4人だけで、?と無答はそれぞれ3と12あった。誤りの多くは、挙げた不活性原子のうち一番重いものを液体であるとしていた。

(3)液化しやすいものこそ、上述の最も重いものであるのに、この答をした人は21名(34%)で、最も軽いものとした者も14名(23%)いて、誤りの最高であった。

(4)、(5)、(6)は互いに関連のある問であって、原子番号の大きい、重い原子は電子あるいは電子雲を多くもつので、分極しやすくなり、分子間力が強まって、気体性がへり液体性がふえる。つまり、凝縮しやすく、沸騰しにくく、沸点が高くなる。このように一貫性のある考え方でできている者は7名(11%)にすぎない。たとえ、部分的に正答していても(32名、52%もいる)正解とはいえない。

(7)上述より、不活性気体のうち理想気体に最も近いものはHeであって、31名(50%)の正解者がいた。誤りと無答は残りを二等分している。

(8)正解として示した3項目、閉殻・安定・非反応的の書けた人は1人もいなく、多いものからの順に言えば、1項目だけの閉殻33名(53%)、安定14名(23%)、非反応性8人(13%)に続いて、2項目の安定と非反応性2人(3

%), 閉殻と安定, 閉殻と非反応性 1 名 (2%) ずつであった。残りの 3 名 (5%) は無答である。

この不成績を講評したのち行なったテスト 7 の文章の正誤判定を求める問題「(1)重い気体ほど, 一般に凝縮しやすく, 液体になりやすい。

(2)分子間力の強い液体ほど蒸発熱は大きい。したがって, 気化しにくく, 沸点も高い。」

では, さすがに間違える学生も少なく, 前回の欠席者 (10回のテスト中最高の 15名) で講評を聞いてなく今回のテストの両問とも正解できたのは 9 名, 両問とも間違えたのは 1 名だけで, 残りの 5 名は正誤 1 問ずつであった。そして, 全体の正解者は(1)58人 (79%), (2)64人 (88%) で, 誤答は(1)14人 (19%), (2) 7 人 (10%), 無答(1) 1 名 (1%), (2) 2 名 (3%) で欠席者は 4 名のみであった。なお, 前回出席して誤答し, 講評も聞いていて, 今回再び誤答した学生(1) の 13 名と(2) の 5 名については, 今後, 調査する予定である。

テスト 7 には, 次の比熱とモル体積の 2 問題も含めておいた。

比熱の問題とは

「気体 1 モルの温度を  $1^{\circ}\text{C}$  だけあげるに要する熱量 (モル比熱) についての次の間に答え, ( ) の中は適当と思うものを一つ残して他を消し, そうした理由も述べよ。

(1)気体の体積を一定にしたままの定積比熱と, 圧力を一定にしたままの定圧比熱とで差がある (ない) と思うわけを述べよ。したがって, 定積比熱 ( $>$  =  $<$ ) 定圧比熱である。

理想気体の定圧比熱は  $5 \text{ cal/mol}\cdot\text{deg}$  である。実在気体については (単位  $\text{cal/mol}\cdot\text{deg}$ )

He, Ar など	約 5
$\text{H}_2$ , CO, $\text{N}_2$ , $\text{O}_2$ , など	約 7
$\text{H}_2\text{S}$ , $\text{NH}_3$ , $\text{CH}_4$ など	8 ~ 9

である。

① He, Ar が理想気体と同じ比熱の値をもつのは (単原子気体である 不活性気体である 閉殻電子構造である 分子間力がない) ためである。

⑥ 上記のように、比熱の値に差が生ずるのは（気体分子の構成原子数 分子の形 分子のもつ運動の自由度 分子間力）のちがいのためである。」

であり、モル体積の問題は

「理想気体の1モルは標準状態で22.4lの体積をもつ。実在気体は22.4lより（大きい 小さい 変わらない）。その理由は（分子の大きさ 分子の重さ 分子の構造 分子間の引力 分子間の斥力 これら以外）のためである。」  
 であって、比熱の問題と同じ解答のしかたを要求した。

比熱の問題はやや難解とも思ったが出題してみた。結果は、正解の定積比熱<定圧比熱とした人数9（12%）は誤答の>とした人数13（18%）を下まわり、=とした人数30（41%）のやや大きいのが目を引いた。差がないと思うと答えておいて式には不等号>と<を用いた各1名を除けば、残り19名（26%）はすべて無答あるいは部分的に答えていなかった。比熱の値については予想通り、全くの不良成績で、正解（①単原子気体⑥運動の自由度）なし、準正解とした①単原子気体⑥分子構成の原子数または分子の形を選んだ者が3名（4%）のみで、他はすべて誤答か、部分的無答であった。

モル体積の問題では、実在気体のモル体積は22.4lより小さく、その理由は分子間の引力のためとするのが正解である。正解者は38名（52%）いた。この問題も、部分的に正答しても正解にはならない。

モル体積の成績がかなり良かったので、さらに、やや難しくした問題

「標準状態にある気体のモル体積の値（単位l）

不活性気体	He, Ne, Ar	22.4
単体気体	H <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	22.4
	Cl <sub>2</sub>	22.1
化合物気体	CO, NO	22.4
	CO <sub>2</sub>	22.3
	NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S	22.1
	SO <sub>2</sub>	21.9

について、次のわけを簡単に説明せよ。

(1)不活性気体が22.4を示すわけ

(2)単体や化合物の気体に22.4より小さな値のものがあるわけ

(3)CO<sub>2</sub>の値がCOより小さいわけ」

をテスト8でやらせてみた。

結果は(1)と(2)の正解者48名(67%)と45名(63%),誤答21名(29%)と19名(26%),無答3名(4%)と8名(11%)の数字が示すように,かなり良いといえる。しかし,(3)のCO<sub>2</sub>とCOの間は分子量と分子間力の両方に言及すべきであったのに,どちらか一方の理由のみにしか触れず,分子間力24名(33%),分子量14名(19%)であって両者とも書いた正解者は7名(10%)のみで,誤答と無答がそれぞれ14名(19%)と13名(18%)いた。

テスト8に加えたもう一つの問題は実在気体の水溶性に関するもので「水素,酸素,一酸化炭素,二酸化炭素,アンモニア,塩化水素を詰めた6つの試験管がある。それぞれの試験管を図のように

ビーカーの水の中で口を開くとき

- (1)水が急速に試験管内に侵入するのはどれか。
- (2)そのわけはなぜか。巨視的理由を書け。
- (3)前記の理由を粒子の立場から微視的に書け」

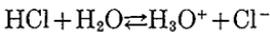
であった。

正解は

(1)アンモニアと塩化水素

(2)どちらも,水によく溶けてアンモニア水と塩酸になるから

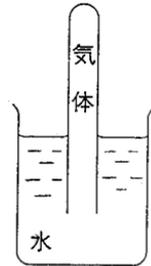
(3)アンモニア,塩化水素ともに極性の強い分子で,水分子も極性をもつから,相互間に強い分子間力がはたらき,化学反応



がおきるから。

この種の問題は,調査テスト2において,二酸化炭素の水溶液に関するものと,テスト7の文章の正誤判定を求めた10問のうちに入れておいた1問

「酸性やアルカリ性の気体は水と結合する力(分子間力)が強く,よく水に溶ける」



第1図 気体の溶解性

とによって、既に、テスト教育はすませたものである。

学生の示した解答結果は

(1)正解者は18人(25%)いた。アンモニアだけ12人(17%)、あるいは塩化水素だけ17人(24%)しか答えなかった者や、二酸化炭素とアンモニア4人(6%)のような組みあわせにした者もいた。

(2)水によく溶けるからと正解したものは40人(55%)で、誤答と無答が30人(42%)と2人(3%)いた。

(3)解答として反応式まで求めたわけではなかったが、やはり式を書いた学生はいなかった。イオンになるとした者は若干(2名)いた。分子間力によるとした者が大半で47名(65%)、誤答と無答がそれぞれ14名(19%)と11名(15%)いた。しかし、以上の数字は各問を独立に見た場合であって、(1)、(2)、(3)を通して正しく、アンモニアと塩化水素と解答できた者は14名(19%)で、アンモニアあるいは塩化水素だけを正しく答えられた者は、それぞれ6人(8%)と5人(7%)である。

## 6. 気体反応

テスト4に採用した化学反応の問題は

「標準状態の酸素ガス32gと水素ガス4gを混合したもの(爆鳴気)に日光をあて爆発的に化合させ水にする場合の化学反応について

(1)化学方程式を書け。

(2)分子モデルを用いて図形で示せ。ただし、標準状態を右図のような縮尺であらわせ。

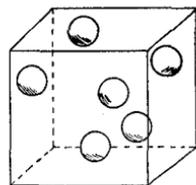
(3)水素の燃焼熱は約58Kcal/molであり、水の気化熱は539cal/gである。熱化学方程式を作れ。」

である。出題趣旨は、おそらく書けるであろう

(1)の化学方程式  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$  の

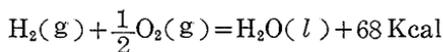
(2)化学的および物理的意味、つまり方程式の係数と、分子の結合の変化と状態のちがいを図示させ

(3)単位をちがえて与えてある燃焼熱と気化熱のデータを正しく合計して反応

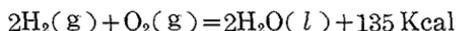


第2図 標準状態の1モルの気体のモデル図  
体積22.4l  
分子数 $6 \times 10^{23}$

熱を算出して



あるいは



と書けることを求めたのである。

テストの結果は

(1)の方程式を書けなかった者が約1割いる。

(2)方程式を正しく書けた者(60名, 91%)のうち約半数(29名, 44%)は係数の意味を図解しており, そのまた半分以下(12名, 18%)の者しか分子結合の変化を正しく表現できていない。状態の区別を示す図の描けた者は皆無であった。

(3)反応熱を正しく算出できた者は3人(5%)。間違いの大半は, 2つのデータの単位, Kcal と cal および mol と g をそろえて合計することに失敗している。

テスト7の文章の正誤判定問題の1つとして, 反応平衡に関する問「熱化学方程式  $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{NH}_3 + 22 \text{ Kcal}$  よりアンモニアの生産率は温度も圧力も低いほど高いといえる」を出しておいた。

テスト4の爆鳴気の問題についての講評と説明がよく理解されておれば, 化学平衡について, たとえ今迄に学習したことがなくても, 誤りの指摘はできるだろうと考えての出題であった。実際, 誤りと判定した学生は半数を越して45名(62%)に達し, 発熱反応だから温度は下げた方が, また, 方程式の係数1:3:2の関係より圧力は高めた方が反応は右へ進むと約4人に1人の割合いで(20名, 27%)正しい解釈をしていた。なお, 結果の分類データを第7表に掲げておく。

テスト9に出題した気体反応の問題は「硫化水素ガス500cm<sup>3</sup>を同温同圧の空気中で燃焼させるには何cm<sup>3</sup>の空気が必要か。(ヒント:  $\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$ )」  
 [=ではない/]  
である。

第7表 「反応促進文」の解答分布

文章判定		誤文				正文	?	
反応促進 の条件	温度	低	高	高	?	16 (22)	12 (16)	
	圧力	高	高	低	?			
解答者数(人)		20	6 (8)	4 (6)	15 (21)	計 53 (73)		
(同百分率%)		(27)						
解答の正誤		正解	誤答					

ヒントを加えたのは、それなしでは正解をあまり期待できないと思ったからである。しかし、このヒントでも役立つなかったようで、正解者は20人(28%)で、 $\frac{1}{4}$ を少し越した程度である。間違いの主な理由は

第1に、方程式  $2\text{H}_2\text{S} + 3\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$  を完成することができず、したがって係数がわからないため  $500\text{cm}^3$  の  $\text{H}_2\text{S}$  の燃焼に必要な  $\text{O}_2$  量  $750\text{cm}^3$  を出せなかった(35人, 49%)。

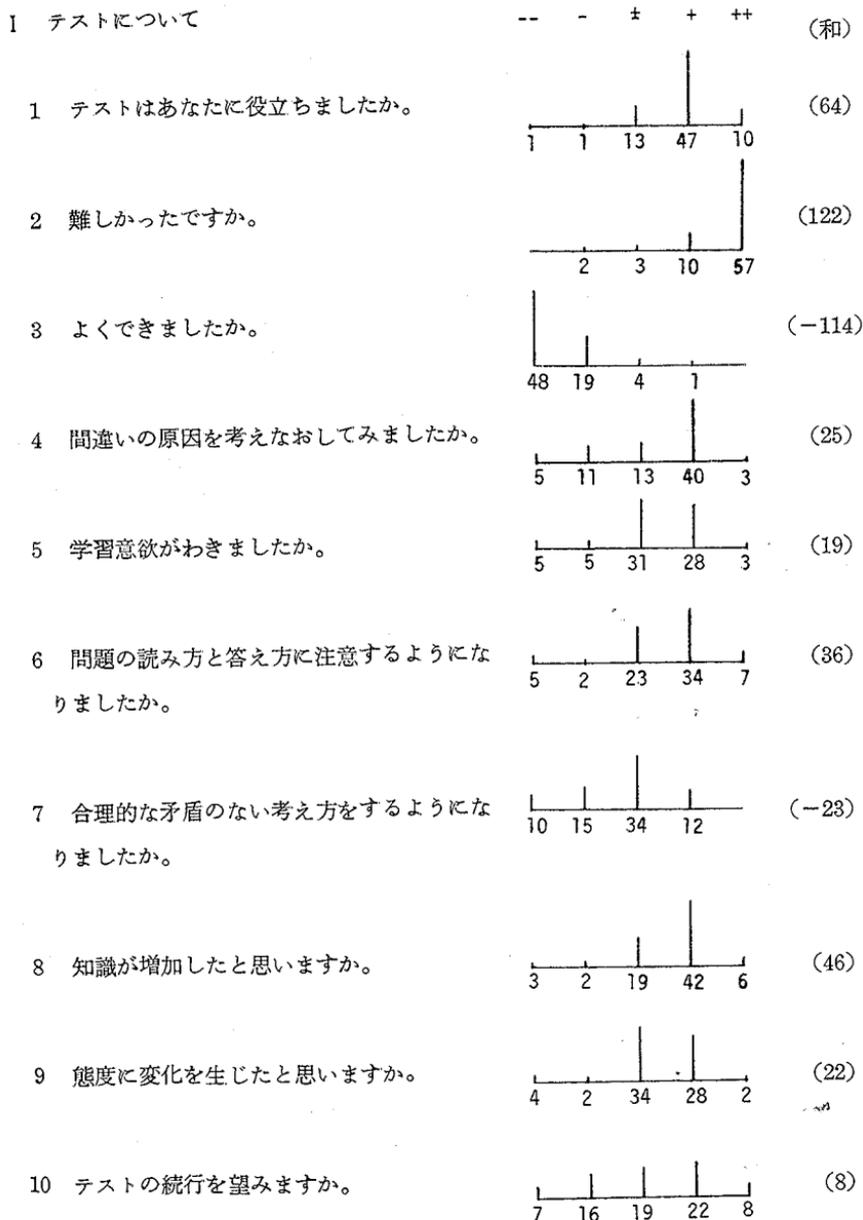
第2に、空気を  $\text{O}_2$  1 と  $\text{N}_2$  4 の体積比の混合物として、求める空気量を  $750 \times 5 = 3750\text{cm}^3$  とすることができなかった(14人, 19%)。

## 7. まとめ

「気体性」についての当報告を読まれ、これはなにかの間違いでなかろうか、本当のことを伝えているのかしらと怪しむ人が多いだろう。最初の数回の間は、われわれ自身も疑った。学生があまりに馬鹿らしい、面倒くさい調査やテストに非協力的な態度をとり、いいかげんに書きなぐっているのではないかと思った。そこで、テスト6からは評価結果を単位取得の学習成績にいと宣言した。以後、いくら真剣に答案が書かれているようには見受けられたが、成績は少しも良くならない。これで、すっかり忘れていること、知らないこと、論理的に筋道を立てて考える力がないことなどのための不良成績であるとわかってきた。そして、このことは、テスト10の終了後に行なったアンケート調査にもはっきりと現れている。

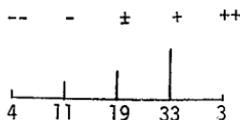
アンケートはテストに対する10項目と、気体性の学習についての10項目の質問よりなり、各項目とも5段階評価法を採用し、各質問に対して諾を+で、否を一で表わし、その程度のちがいをいれて++、+、±、-、--の5段階に

第8表 アンケート調査の結果



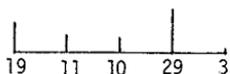
II 気体性について

1 気体とはどんなものかわかりましたか。



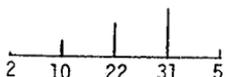
(20)

2 理想気体について既に知っていましたか。



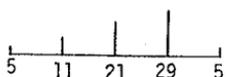
(-14)

3 気体に対するイメージが変わりましたか。



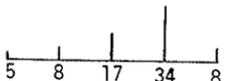
(27)

4 気体の性質をミクロ的に考えるようになりましたか。



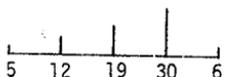
(18)

5 電子配置と原子の性質との関係がわかりましたか。



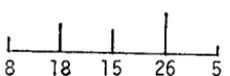
(32)

6 分子内の原子を結ぶ力がわかりましたか。



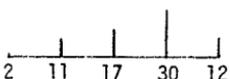
(20)

7 分子間の力がわかりましたか。



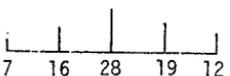
(2)

8 分子間力と物質の状態との関係がわかりましたか。



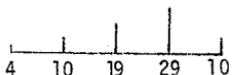
(39)

9 気体の圧力, 体積, 混合, 水溶性などと分子間力との関係がわかりましたか。



(-7)

10 気体の性質を理解するのにマクロとミクロの使い分けがわかりましたか。



(31)

した。アンケート調査のまとめた結果を第8表に示してある。表を見やすくするため、実施の調査用紙の記述とは順序や表現を若干変えてある。表の数字は人数であって、各項目の人数和が必ずしも一致しないのは、無答があったためである。また、右端の（ ）内の数字は、+、-にそれぞれ+1、-1を対応させて、各項目ごとの重みをつけた和である。

この調査報告は、まえおきにも述べたように、開始したばかりの概念形成に関する研究の一部である。概念形成のしかたは学生ひとりひとり異なる形をとるであろう。したがって、個々の学生について調査・研究する必要があるが、今回の報告は学生全体の統計的なものを主にした。今後、同じ資料で個々の学生の学習経過をあとづけていく研究をすすめるとともに、このテスト教育によって得られた知見に基づいて大学生・高校生・中学生の概念形成についての調査・研究の具体的方法を計画し、実行していく予定である。それには、多くの人たちの協力を必要とする。御指導と御援助をいただければ幸いである。

研究推進にあたり諸注意下さった本学部心理学教室の中塚勝俊先生、ならびに資料作成と整理に協力と援助いただいた多くの人たち、とくに専攻科学生辻野忠男君に謝意を表明する。調査・研究に要した費用の一部は文部省科学研究費によった。