The Chemical Society of Japan

ロケット推進薬の燃焼のしくみを定量的に探求する

TANI Toshio
谷　俊雄
常葉学園橘高等学校　教諭

高校生が部活動でロケットを研究テーマとし，安全で定量的に探求活動を行った展開例を紹介する。この研究には次のような特徴があった。①静岡県岡部町の「竜勢保存会」に出向き，竜勢*1（ロケット花火）の調査を行い，推進力を考察した。②ロケットを飛ばさずに推進力を定量化する方法を考案した。③燃焼反応に使う材料を単純化し，化学量論的な考察を行った。④高校化学，高校物理での学習内容との関連性を重視した。

1　はじめに

私の前任校である常葉学園菊川高等学校自然科学部では，1992年から，高分子化合物に酸化剤，金属粉などを混合した固体燃料ロケット推進薬[1]の燃焼に関する研究を行ってきた。ロケットなど火薬を使う実験は，生徒の好奇心を大いに刺激する。反面事故を招く可能性が大きい。そこで，生徒と研究内容を検討していく際に，「ロケット推進薬の反応の解析である」という研究の方向性を明確にした。さらに顧問教師との約束事により，事故を防止する意識を植え付けた。①実験方法について，事前に顧問教師と打ち合わせを行う。②危険を伴うような大きなスケールでは行わない。③観測者が装置から離れた位置で測定できるよう工夫する。以上，安全への配慮を最優先とした。

2　静岡県岡部町の竜勢の調査[2]

1997年7月岡部町教育委員会を通して，当時竜勢保存会会長の村越俊郎さんにお会いする機会を得た（図1）。竜勢の歴史，製作の手順などをお聞きした。これらの調査結果と固体燃料ロケット*2を比較することで，推進薬の燃焼のしくみを明らかにしようとした。

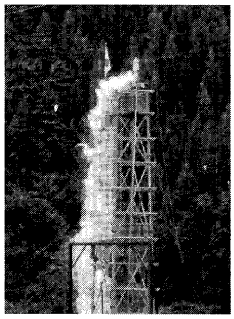


図1　竜勢の打ち上げ風景。

黒色火薬を推進薬とする竜勢の推進力について次のような考察を行った。竜勢の質量はおよそ25 kgである。地上0 mで静止した状態から鉛直上向きに等加速度運動で飛行すると仮定し，7秒間に約250 mの高さまで上昇する。

$S = v_0t + 1/2\,at^2$　S；高度 v_0；初速度　t；飛行時間

$ma = F - mg$　a；加速度　F；推進力　g；重力加速度

を用いて概算すると，上向きの推進力は約500 N，竜勢本体にかかる重力の約2倍であると考えられた。

3　ロケットの推進力の測定方法

私たちの最大の課題は製作したロケットの推進力を安全に測定する装置を作ることであった。ワイヤーで吊し滑走する方法，線路上で台車を走らせる方法等，試行錯誤を繰り返したが，発生する熱で装置自体がすぐに破壊されてしまった。最終的にたどり着いた方法は，梵鐘用の撞木をモデルにした装置であった。中心に片側を封じた長さ7.5 cm外径1.9 cm内径1.5 cmの水道用ステンレスパイプを5本のステンレスワイヤーで吊した。装置の外枠は，ホームセンターで購入したラック用の部品を組み合わせた（図2a）。

中央のワイヤーの根元に分度器を取り付け，ワイヤーが最大に振れたところまで分度器が動き，そこで止まるようにした（図2b）。この装置の利点は，推進薬を詰め燃焼させ

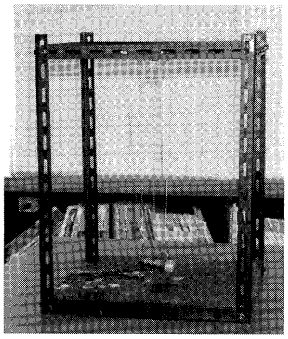


図2a　推進力測定装置。

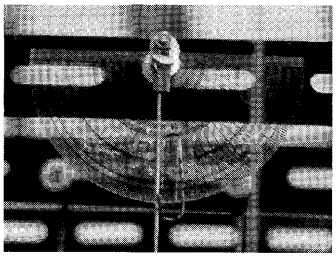


図2b　分度器による振れ角の測定。

*1 滋賀県，埼玉県，静岡県に伝承されているロケット型花火。
*2 本研究での推進薬の構成は，酸化剤 $KClO_4$ または $NaClO_4$ 燃焼剤 C（活性炭）発熱剤 Al　触媒 MnO_2 であった。

NII-Electronic Library Service

The Chemical Society of Japan

るステンレスパイプの部分が，地面に対して平行に振れること，燃焼中の姿勢が安定していることの2点であった。

推進力を測定する原理を次に示した。ワイヤーの張力の合計をT，振り子にかかる重力をmg，推進力をFとすると，この3力が釣り合った時，推進力FはF = mg tan θ と表される（図3）。実際に飛行するロケットの質量は約20 gであり，ロケット本体にかかる重力の2倍を推進力とするとF = 0.39 Nとなる。一方，図1のパイプ部分の質量はワイヤーに接続する金具を含めて170 g，推進薬の質量は10 gであり，振り子にかかる重力はmg = 1.76 Nである。この結果 tan θ = 0.22となり，この装置が10～15° 振れるような推進薬の調製を目標にした。

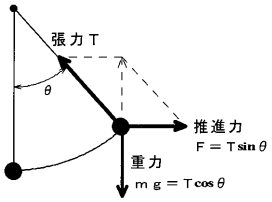


図3　推進力測定の原理。

4　過塩素酸塩の熱分解反応と化学量論

本研究では，酸化剤として$KClO_4$と$NaClO_4$を用いた。推進薬の効率の良い配合比を求めるため，この2つの物質の熱分解反応について化学量論的考察を行った。十分に洗浄し，乾燥した試験管に過塩素酸塩0.01 molを入れ，電気炉で加熱した。発生した気体はゴム管を通り，水槽内のメスシリンダーに水上捕集で集めた。危険防止のため，ゴム管にはトラップを設け，電気炉部分と水槽部分の間に透明なアクリル製のフェンスを置き，実験中電気炉部分に近づかないようにした（図4a, b）。電気炉内の温度を測定しながら，温度が10℃上昇するごとにメスシリンダー内の気体の体積を記録した。$NaClO_4$は500℃ぐらいで融解し，気体の発生が盛んになった。$KClO_4$は580℃を越えると融解し，盛んに気体を発生した。反応終了後，発生した気体の全量は，いずれも30℃，1 atmで490 ml前後であり，これは0.02 molに相当した。さらに試験管内の残留物からCl^-を検出した。この水溶液の溶質を再結晶し，NaCl，KClを確認した。したがって，これら過塩素酸塩の分解反応は次式であると考えた。

$$MClO_4 \rightarrow MCl + 2O_2 \quad (M = Na,\ K)$$

5　その他高校化学との関連づけ

この外，高校化学での学習内容を駆使して疑問点の解決を試みた。これには授業で学んだことが科学的な探究の手段であることを認識させる目的があった。

(1) 過塩素酸塩の熱分解速度

電気炉内の温度を600℃に保ち，過塩素酸塩が分解し発生する気体の経時変化を測定した。

(2) MnO_2は触媒か酸化剤か

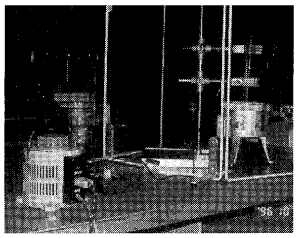


図4a　危険防止用アクリルフェンス。

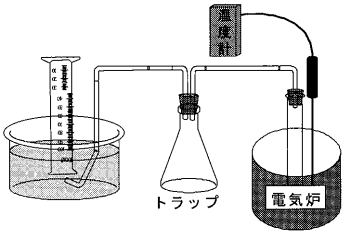


図4b　発生気体の捕集方法。

過塩素酸塩分解時に発生する気体中の塩素をヨウ化物イオンで検出し，さらにチオ硫酸ナトリウムを用いた酸化還元滴定で，酸化されたヨウ素を定量した。

(3) 金属の燃焼熱[3)]

発熱剤として加えるアルミニウム粉末の効果を評価するために，Mg，Al，Zn，Feの4種類の金属について燃焼熱を算出した。金属が燃焼して発生する熱量を直接測定することは困難であるため，金属と塩酸との反応熱，金属酸化物と塩酸との反応熱を測定し，ヘスの法則を使うことで燃焼熱を算出した。

6　ま　と　め

先輩から後輩へ何代にも引き継がれた研究は悪戦苦闘の連続であった。この泥臭さこそ自然科学教育の真髄であると信じているが，近年この悪戦苦闘に耐えられない生徒が増え，部員確保に悩む毎日ではある。私自身も，この研究指導を通した生徒とのやりとりの中で多くのことを学んだ。

(1) 先人の知恵

竜勢の推進薬を調製する上で，伝承の秘伝「渋」と「湿し」*3が，打ち上げの成否を握っている。「渋」は，燃焼を促進する触媒に当たり，一方「湿し」は爆発を防ぐための工夫のようである。十分な検証には至らなかったが，生徒たちもこの伝承の秘密については大変興味を持ち，科学的なデータを集めようと試みた。私たちは，改めて先人の知恵の深さを学んだ。

(2) 高校生たちの交流

本研究の成果は，1997年東海地区高等学校化学部研究発表会および日本学生科学賞中央審査で発表させて頂いた。

*3 柿や茶の渋を日本酒等で抽出し，その水分と共に火薬に含ませること。単に黒色火薬のみより安定した推進力が得られるそうである。

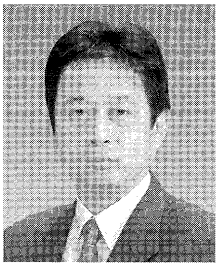
NII-Electronic Library Service

The Chemical Society of Japan

東海地区の発表会では本県ののんびりとした風土に育った本校生徒たちが，都会の高校生たちが発する矢継ぎ早の質問にたじたじとなった。十分に答えられなかった生徒たちは，休憩時間を使い，質問者の高校生たちと活発に意見交換を行っていた。短い発表時間に要点をとらえ質問する高校生たちの姿に敬服した。将来専門家の道に進んだときに必要となる能力とは何かがわかる象徴的な光景であった。

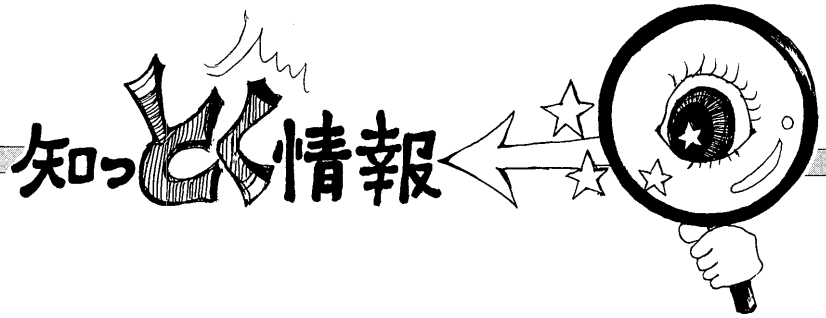
参考文献

1) 伊藤秀明, 杉山美次, 化学と教育, 296, 37 (1989).
2) 岡部町教育委員会,「静岡県選択無形民族文化財　朝比奈の竜勢」(1985).
3) 赤堀四郎　他, 増訂化学実験事典, 講談社 (1984).



たに・としお

筆者紹介［経歴］1981年東北大学大学院理学研究科修了（修士），常葉学園菊川高等学校を経て98年より現勤務校。［専門］専攻は錯塩化学，現在は子供向けの実験メニューの開発。［趣味］ウォーキング，休日の料理。［連絡先］420-0911 静岡市瀬名二丁目1番1号(勤務先)。



カット：井上友里

濃硝酸と不動態

「濃硝酸を注文して，鉄片を入れて，不動態を作ろうとしたところ，鉄片が溶けてしまった。教科書の記述によれば？」ということを耳にする。私も，希酸で前処理をした後，紙ヤスリでよく磨いた鉄片の小片に，注文した濃硝酸を加えて実験してみたところ，確かに溶けてしまった。ところで「濃硝酸」と注文した場合，業者が持ってくる濃硝酸の濃度は60%である。教科書・参考書はというと，まちまちではあるが，古い教科書・参考書になるほど濃硝酸の濃度は70%と記載されている。さっそく70%濃硝酸を用いて実験したところ，確実に不動態となった。補足となるが，60%濃硝酸には特級と一級がある。大手メーカーに問い合わせたところ，一級と特級の差は商品としてはないが，特級に関しては成分の検査項目が多くなり，品質を保証できるとのことであった。

とにも，かくにも鉄片を用いて不動態の実験をする時には，昔（？）の教科書・参考書の記述どおり70%濃硝酸で行うのが，お勧めである。

(神崎夏子)

イラスト：角井桃子

NII-Electronic Library Service