

日本の理数教育をサポートする

Rimse

Research Institute for Mathematics and Science Education

No. 43
June
2025

特集

評価から見た主体的・対話的で深い学び II



巻頭言

国際量子科学・技術年を迎えて思うこと
—理学と工学および人文学の支え合いへの期待—

奈良国立大学機構 理事長 榎 裕之

特集 評価から見た主体的・対話的で深い学び II

- 2 **I** 中学校理科における考察記述の充実
～相互評価活動を用いた実践～
静岡県藤枝市教育委員会 指導主事 山内 慎也
- 5 **II** 評価における DX が生徒の主体的・対話的で深い学びを実現する
～相互評価とジェネリックスキル～
奈良県立青翔中学校・高等学校 教諭 生田 依子
- 9 **III** 地域に根ざした評価の在り方からの授業改善
～栃木県那須地区の取り組みにおいて～
栃木県那須塩原市立東那須野中学校 教諭 熊田 憲朗
- 13 **IV** 高等教育における相互評価を通じた資質・能力の育成
福岡教育大学 副学長・教授 伊藤 克治

- 17 **連載** やさしい電気化学 ～化学変化で起こす電気、
電気で起こす化学変化～ 第 7 回
電気エネルギーから化学エネルギーへ—電気分解について
東京学芸大学 名誉教授／国際基督教大学 客員教授 鎌田 正裕

- 20 **連載** 確率の現代的活用 第 8 回
「ゲーム」の数学理論
東京大学 名誉教授／(株) ペイズ総合研究所 代表取締役 松原 望

- 23 **連載** 物理用語の成り立ち ～万物の根源を求めて～ 第 8 回
放射線 (radiation)
アルファ粒子, ベータ粒子, ガンマ線 (α -particle β -particle γ -ray)
元徳島県公立高等学校 教諭 西條 敏美

特別寄稿 清水静海先生追想

- 26 **①** 教育政策の大局的なビジョンと数学を楽しむ心
—回想の静海先生—
筑波大学人間系 教授・教育学域長 清水 美恵
- 28 **②** 静海先生に教えられた二つのこと
文教大学教育学部 教授 永田 潤一郎

- 30 **教育に新しい風を** —東京懇談会より—
「令和の日本型学校教育」を担う新たな教師の学びの姿について
—今こそ、大学、教育委員会、学校の三者連携・協働の取り組みの充実を—
日本体育大学 教授 佐藤 浩

- 32 **広場** 地域教育で活躍する人々 第 42 回
地元 (埼玉県加須市) の算額の中学校数学での活用と算額文化の普及
かぞ算額文化保存会監事／前 加須市立加須北中学校 校長 中里 孝

数学と言葉 第 8 回

数学用語 その 6
指数と 3 つの e

サイエンスナビゲーター® 桜井 進



榎 裕之 / さかき ひろゆき

2022 年から現在は奈良国立大学機構理事長。
1944 年名古屋生まれ。73 年東京大学大学院
電子工学専攻博士課程修了, 工学博士。73 年
から 2007 年の間は東京大学生産技術研究所や
先端科学技術研究センターの助教授や教授。Si
MOS 電界効果トランジスタの極薄伝導層, 超格
子, 量子細線や量子ドットなど, 半導体ナノ構造
中の電子の量子効果の解明と素子応用の研究に
従事。この間, 76-77 年の一年半は米国 IBM
研究所 Esaki グループ客員研究員。2007 年
東京大学名誉教授。07 年から 22 年の間は豊
田工業大学副学長・学長・フェロー。米国電気電
子工学会 D. Sarnoff 賞, 紫綬褒章, 日本学士院賞,
文化功労者, 文化勲章など受賞。日本学士院会員。

国際量子科学・技術年を迎えて思うこと

—理学と工学および人文学の支え合いへの期待—

量子科学の夜明けから125年, 数理基盤の確立から100年

1900年にプランクは黒体放射との関連で光のエネルギーの量子性の概念を提唱。その後、ボーアが原子の光分光特性を説明するためのモデルとして前期量子論を展開した。1924-25年にドブロイが電子を含めた物質波の概念を提示し、直後にハイゼンベルグやシュレーディンガーらが量子科学の数理基盤を確立した。その結果、量子科学が大発展し、わが国でも湯川秀樹の中間子論など、世界的な成果が達成され、量子技術分野でも江崎玲於奈によるトンネル素子の発明や赤崎勇らによる青色LEDの実現など顕著な貢献がなされてきた。国連は2025年を「国際量子科学・技術年」と名付け、量子科学・技術への関心を高め、人類が科学技術と健全な関係を築くよう求めている。筆者は半導体物理と電子工学が交差する領域で研究をしてきたが、理学と工学の支え合いに関して所感を述べる。

量子技術の発展と社会と学術への影響

この百年の量子技術の進展で、① ナイロンや医薬など新物質の合成技術、② 原子力発電やNMRなど原子核関連技術、③ トランジスタやレーザなど計測・情報技術が大発展してきた。この結果、①では、医薬や衣類が健康保持に寄与した反面、素材の廃棄などが環境汚染を招き、②では、NMRや原子力発電が医療や電力供給に貢献した一方、原発事故の事後処理や核兵器に伴う国家間の緊張増大が課題となっている。③でも、ITの普及で利便性が増し、宇宙観測やゲノム解析に活用された反面、サイバー犯罪やゲーム依存症の影響も懸念されている。これら技術の功罪に的確に対処するには、理工学と人文学を統合させた取組みが必須だが、本稿では、半導体工学の研究において量子的な概念がどう活かされてきたかに絞りを絞り、工学と理学の交流が相互の発展に如何に貢献してきたかを論じたい。

2種のトランジスタが拓いたIT革命と量子物理学の新領域

1948年と60年に誕生した2種のトランジスタは、信号増幅などの機能を備え、IT革命を牽引したが、量子物理学の発展にも貢献している。48年に発明されたバイポーラ・トランジスタは、特定の不純物を導入し伝導電子数を増やしたN型半導体と、別の不純物を導入して正孔の数を増やしたP型半導体を積層したNPN型構造を持つ。通常は中央のP層が電子の障壁となり、両端のN層間には電流が流れないが、中央層の障壁作用を電氣的に下げると導通性が増し、増幅作用を示すため電子機器に広く使われ、58年にノーベル賞が授与されている。続く58年、江崎玲於奈博士はSONYにおいてPN間の伝導性を調べる中で素子内の不純物濃度を高めると障壁の作用が弱まり、電子が量子的にトンネル透過することを発見した。この研究は、その後に4節で述べる超格子構造の概念の基

盤となった他、1962年に超伝導電子が関与するトンネル効果(ジョセフソン効果)誕生を誘発する役割も果たしている。この業績で73年に江崎博士はノーベル物理学賞を受けた。

他方、1960年に誕生のMOS電界効果トランジスタ(FET)は、金属(M)と酸化膜(O)と半導体(S)を積層化した構造を持つ。金属と半導体間に正の電圧を加えると半導体の表面に電子が蓄積し、伝導層が形成されるため、表面に沿う伝導性が増し、増幅機能を示す。MOS-FETはITを支えるLSIに必須の素子だが、量子物理学にも大きく貢献した。その理由は、素子内に形成される伝導層中の電子は、金属電極上の正電荷と引き合うために、極めて薄い領域に量子的な波として閉じ込められることによる。このため、電子の自由運動は層内の2次元空間に限られる。この2次元電子系を強磁場中に置くとサイクロトロン運動を行うため、電流は主に伝導層の外周を流れ、量子ホール効果と呼ぶ特異な特性を示す。この発見は80年になされ、5年後にノーベル賞が授与された。なお、電流 I を流したときに電流と垂直方向に現れる電圧 V と I との比で決まる抵抗値 (V/I) はプランク定数 h と電子電荷 e のみで決まる $(h/e)^2$ の整数分の一になるため、電気抵抗の標準に採用されている。

ヘテロ構造・超格子・量子ドットの研究の紹介および江崎博士への謝辞

工学と理学の支え合いは、他にも多くの事例がある。1960年に登場したレーザは量子機器の代表格だが、光への変換効率の低さに課題があった。この課題は、電子親和力に秀でた半導体膜Aと障壁機能を持つ異種半導体膜Bを配したBAB型ヘテロ構造を用いた半導体レーザが70年に登場して解決され、計測や光通信の飛躍の発展が齎された。同じ70年、江崎博士はBABA型の超格子の概念を提唱し、A層で電子を量子的に閉じ込め、B層で電子のトンネル透過を制御すれば、種々の素子機能が実現できる可能性を指摘した。その後、超格子の設計や形成技術が進展し、半導体レーザやLEDでは極薄発光層が使われ、2次元電子の利用が定着した。なお、筆者と荒川泰彦がナノ粒子(量子ドット)に閉じ込められた電子を発光素子に用いる提案も行ったため、関連研究が進展することになった。

以上、述べたように、半導体工学は、永年に亘り量子科学と互恵の関係を維持してきた。こうした学問領域を横断する努力が今後もなされることを望んでいる。なお、技術が齎す種々の課題の解決のためには人文系の知恵との支え合いが進むことも祈念している。

本稿を閉じるに当たり、2025年3月12日に百歳を迎えられた江崎先生のご長寿を祝すとともに、1972年以来、頂いてきた知的啓発とご支援に心から謝意を表する。



I 中学校理科における考察記述の充実

～ 相互評価活動を用いた実践 ～

静岡県藤枝市教育委員会 指導主事

山内 慎也 / やまうち しんや

愛知教育大学大学院・静岡大学大学院 教育学研究科共同教科開発学専攻 博士課程修了。博士（教育学）。静岡県公立小学校・中学校に勤務し（富士市立岩松北小学校、掛川市立西山口小学校、藤枝市立西益津中学校、藤枝市立青島北中学校）、藤枝市立青島中学校主幹教諭を経て、2024年4月より現職。



1 ◆ はじめに

理科教育における考察の場面において、主体的、対話的で深い学びの実現が図られ、生徒の資質・能力は育成されているのであろうか。資質・能力を育むために重視すべき探究の過程のイメージでは、「考察・推論」の場面で、観察・実験の結果を分析・解釈する力、情報収集して仮説の妥当性を検討したり、考察する力を、さらに、「表現・伝達」の場面では、観察、実験の結果から考察・推論したことや結論を発表したり、レポートにまとめたりする力を理科における資質・能力の例としている（文部科学省、2017）。また、学習到達度調査（PISA）では、科学的能力（コンピテンシー）として「現象を科学的に説明する」ことを必要な要素の一つとしている。これらのことから、考察の場面において、生徒の資質・能力を育成するためには、結果を分析・解釈し考察を書くことに加えて、現象を科学的に説明し、考察したことを発表したり、妥当性を検討したりすることが必要だと言える。

それでは、考察の場面における生徒の実態とはどのような現状なのだろうか。令和4年度に実施された全国学力・学習状況調査では、「理科の授業で、観察や実験の結果をもとに考察していますか」の問いに対して、「当てはまる」、「どちらかといえば、当てはまる」の回答は、78.8%と高い値を示している（文部科学省・国立教育政策研究所、2022）。しかし、平成30年度に実施された同調査では「理科の授業で、自分の考えや考察を周りの人に説明したり発表したりしていますか」の問いに対して、「学期に1回以上」、「ほとんど

ど、または、全く行っていない」と答えた生徒は、58.5%であった（文部科学省・国立教育政策研究所、2018）。すなわち、理科の授業において考察を書く機会は設定されているが、考察を発表したり、他者と意見交換をしたりする活動や、考察したことの妥当性を検討したり、修正したりする活動が十分に行われていないという課題があると推察できる。

そこで本稿では、考察の場面における上述のような課題を解決しつつ、生徒の資質・能力の育成を目指す取り組みとして、相互評価活動を取り入れた実践を報告する。

2 ◆ 相互評価活動とは

相互評価活動とは、相互評価表を用い、学習者が観察・実験の考察記述に対して、設定した評価規準を用いて他者と意見交換をしながら自己評価や相互評価を行い、得点評価とコメント評価を示した相互評価表を基に考察記述を振り返り、修正・改善する学習活動である（図1）。

また相互評価は、探究の過程のイメージにおいて、表現・伝達の場面の対話的な学びの例として示されている。

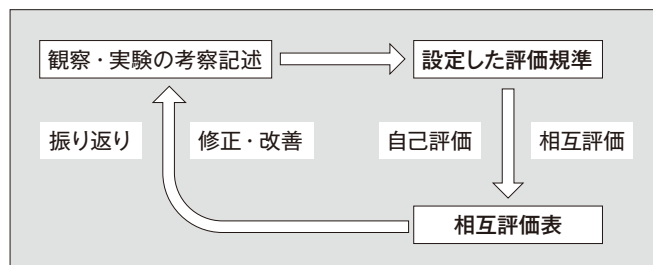


図1 相互評価活動

学習評価については、Bloom らによる理論によって、授業過程で実施される評価の機能を診断的評価、形成的評価、総括的評価という 3 つに大別されてきた。しかし、1990 年代頃から Bloom らによる理論による診断的評価と総括的評価の機能を問い直す動きが出始め、教育評価の機能が評価の実施時期ではなく、評価活動の目的によって区別されるべきであると考えられるようになってきた（一般社団法人日本理科教育学会、2022）。

教育評価の機能を目的によって区別する視点として、Earl は学習評価を機能で再整理し、3 つの評価として「学習の評価」、「学習のための評価」、「学習としての評価」を示している。その中の「学習としての評価」は、学習者が評価主体であり、学習者が自ら学習内容をモニターし、このモニターからのフィードバックを利用して、理解した内容を自己調整することを目的として行われる。そして相互評価活動は、学習活動の中に評価活動を位置付ける「学習としての評価」の考え方に当たる取り組みとして注目されている（一般社団法人日本理科教育学会、2022）。

3 ◆ 相互評価活動を用いた授業実践

(1) 授業のようす

中学 3 年生「中和と塩」において、相互評価活動を用いた授業を実践した。1 時間目は、水酸化バリウム水溶液に電圧を加えると電流は流れるが、うすい硫酸を加えていくと電流が流れなくなり、さらにうすい硫酸を加え続けると再び電流が流れるようになる現象を観察させ、実験結果を基に考察を記述させた。2 時間目は 1 時間目に書いた考察記述に対して相互評価活動を行い、書き直しを実施した。相互評価活動を行う 1 グループは 3～4 人に設定した。授業で用いた相互評価表（表 1）と評価規準の一部（表 2）を以下に示す。

表 1 相互評価表

項目	内容が正しい						適切な文章表現をしている		論理的に表現している				合計
小項目	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
得点													
コメント													／ 12点

表 2 評価規準の一部

論理的に表現している	(9)実験結果や事実を適切に表現している。	電流が流れなくなった後に、(更に硫酸を加えると)再び電流が流れるようになることが表現されていなければ加算しない。
	(10)考えを適切に表現している。	イオンがあるときは電流が流れ、イオンがないときには電流が流れないことが適切に記述していなければ加算しない。
	(11)考えを適切に表現している。	バリウムイオンと硫酸イオンが結合して水硫酸バリウムになること、水素イオンと硫酸イオンが結合して水になること、さらに硫酸を加えると水素イオンと硫酸イオンが増えることが適切に記述されていなければ加算しない。
	(12)感想や気持ちが混ざっていない記述をしている。	「思う」「感じる」「想像する」などの語が含まれていれば加算しない。

図 2 は、授業中に生徒が書いた考察記述の一例である。上段は考察の書き直し前のもの、下段は相互評価活動を行い書き直し後のものである。この生徒の場合、書き直し前は水溶液の性質のみに注目し、自己評価が 3 点であった。しかし、書き直し後は水溶液中に含まれるイオンに注目し、自己評価が 12 点となり改善している。学級全体でも、書き直し後は書き直し前と比べて、自己評価の得点合計が有意に増加した (t 検定、両側検定、 $n = 42$ 、自由度は 41、 $p < .05$)。

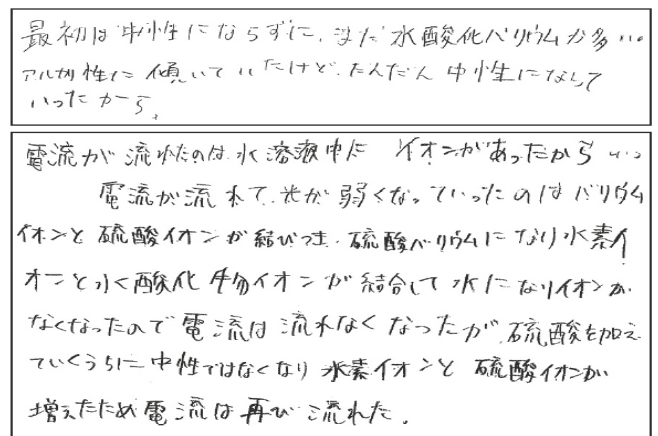


図 2 生徒の考察記述例

生徒からは「班のみんなで意見を言い合えた。全員で改善点を見つけたことができた。」「他の人の考察を見たり、点数をつけることで、自分の文には何が足りないとか、どんなことを書いたらよいかとか、いろいろ知れたからよかったです。」という言葉が聞かれるなど、相互評価活動を行う中で主体的、対話



図 3 相互評価活動のようす

的で深い学びの実現が図られ、考察記述を修正するようすが見られた(図3)。

(2)生徒の考察に関する意識

相互評価活動を行うことで、生徒の考察に関する意識にどのような影響があったのだろうか。そこで、相互評価活動の授業実践前後において、生徒の考察に関する意識を調べる質問紙調査を実施し(表3)、前後の回答分布をWilcoxonの符号付順位検定により比較した(表4)。

表3 質問紙調査における項目

考察の内容	① 観察や実験の結果
	② 観察や実験の感想
	③ 観察や実験を行って大切だと思ったこと
	④ 観察や実験の結果から導く自分の考えや主張
	⑤ 自分の考えを主張するために必要な理科の知識
考察の場面	⑥ 自分の考察を人に説明したり、発表したりしている。
	⑦ 友達の考察の説明を受けたり、聞いたりしている。
	⑧ 自分が書いた考察を、自分で修正することがある。
	⑨ 友達が書いた考察を、あなたが修正することがある。
考察を書く上でのサポート	⑩ 考察の書き方について指導を受けると、学習が進むと思いますか。
	⑪ 考察の内容について、友人やグループで意見交換したり、修正したりする活動があると、学習が進むと思いますか。

表4 記述統計(授業実践前後)

項目	実践前						実践後						p
	6	5	4	3	2	1	6	5	4	3	2	1	
①	10	11	7	9	1	4	14	8	10	4	1	5	n.s.
②	4	8	8	12	3	7	1	5	13	4	9	10	*
③	6	8	7	13	1	7	1	7	9	12	5	8	*
④	20	13	8	1	0	0	17	12	8	3	0	2	n.s.
⑤	9	10	13	7	0	3	17	10	10	3	0	2	n.s.
⑥	2	7	16	7	4	6	4	11	13	8	3	3	*
⑦	19	13	8	1	1	0	16	17	5	2	1	1	n.s.
⑧	11	14	11	4	0	2	15	14	6	4	2	1	n.s.
⑨	3	3	6	9	7	14	3	7	9	9	5	9	*
⑩	12	15	12	1	1	1	24	13	4	1	0	0	**
⑪	18	19	5	0	0	0	27	13	2	0	0	0	*

$n = 42$ ** $p < .01$ * $p < .05$ n.s. $p > .05$

「考察の場面」について、項目⑥と⑨において授業後に有意に大きくなった。これは相互評価活動を行う過程において、生徒は自分の考察を振り返る中で自己評価したり、友達の考察に対して他者評価したりする活動による効果と考えられる。また、「考察を書く上でのサポート」について、項目⑩と⑪において授業後に有意に大きくなった。このことから、友達

と意見交換したり、修正したりするなどの協働的な学習活動を含む相互評価活動は、考察を書く上でのサポートとして肯定的に捉えられていることが示唆される。

しかし、「考察の内容」については、生徒は明確な意識を持っていないことが推察できる。項目②と③において授業後に有意に小さくなったが、項目①、④、⑤において変化は見られなかった。近年の理科教育では、Toulminの論証構造の構成要素である事実、主張、論拠によるアーギュメントを導入し、これらの要素を含むことを科学的な表現とする実践が多く見られる。本実践においては、事実は項目①、主張は項目④、論拠は項目⑤が対応している。これらの項目において変化が見られなかったことから、相互評価活動を取り入れるだけでは、科学的な表現ができるようになることは困難であり課題が残ると言える。

4 おわりに

本実践から、考察の場面において相互評価活動を取り入れることにより、主体的、対話的で深い学びの実現が図られ、生徒の資質・能力の育成に一定の効果があることが明らかになった。しかし、相互評価活動を取り入れるだけでは、科学的な表現に必要な要素である事実、主張、論拠を含む考察記述に改善する点においては課題が残ると言える。相互評価活動に加えて、科学的な表現に必要な要素を指導する授業をデザインし、資質・能力の育成にどのように寄与するか効果を検討していく必要がある。

参考・引用文献

- * 山内慎也・郡司賀透・飯田寛志・後藤顕一(2022)「中学校理科における考察の意識に関する一考察-相互評価活動を用いた学習活動を通して-」『理科教育研究』第62巻,第3号,643-653.
- * 一般社団法人日本理科教育学会(2022)『理論と実践をつなぐ理科教育研究』東洋館出版社,264-270.
- * 文部科学省(2017)『中学校学習指導要領解説理科編』学校図書,9.
- * 文部科学省・国立教育政策研究所(2018)「平成30年度全国学力・学習状況調査 質問紙調査 報告書」85.
- * 文部科学省・国立教育政策研究所(2022)「令和4年度全国学力・学習状況調査 質問紙調査 報告書」53.

II 評価における DX が生徒の主体的・対話的で深い学びを実現する

～ 相互評価とジェネリックスキル ～

奈良県立青翔中学校・高等学校 教諭

生田 依子 / いくた よりこ

1999 年北海道大学水産学部卒業、2001 年北海道大学大学院水産科学研究科博士前期課程終了。
奈良市立京西中学校教諭を経て 2008 年より現職。



1 1 データに基づいた教育の方向性の決定

経済産業省らの教育データ利活用ロードマップでは、教育のデジタル化ミッションを「誰もが、いつでもどこからでも、誰とでも、自分らしく学べる社会」と掲げている^{*1}。また、現行の学習指導要領では教育データの収集、分析、活用を通じて、個々の学習者に合わせた教育や、教員が児童生徒の変容を客観的に見取り指導改善につなげ、教育の質の向上を目指す方向性が示されている。

SSH の取り組みが、教科や領域にとらわれない汎用的な能力であるジェネリックスキルの変容に関わるという客観的な教育効果は十分に明らかにされておらず、生徒自身や教員が生徒の変容を見取る尺度の 1 つとして開発されることが求められている。

本校は文部科学省からスーパーサイエンスハイスクール（以下 SSH）に指定され、令和 7 年度は 3 期 5 年目である。また令和 5 年度からは科学技術人材育成重点校（以下重点校）の指定も受けている。

本校では「多面的評価」を全校体制で実施している。多面的評価は、資質・能力の変容を客観的に見取る「評価規準を明示した相互評価」、相互評価の実践の前後で生徒の意識はどのように変容したのかを見取る「学習意識調査」、生徒のジェネリックスキルの変容を見取る「探究的な学びに関するジェネリックスキルテスト」の 3 つから構成される。これによって、生徒は自身の成長を多角的に把握し、自己認識を深める。教員は客観的なデータに基づいて、生徒の成長を支援でき、複数の側面から生徒の成長を評価することができる。

ここでは、「多面的評価」のうちの「評価規準を明示した相互評価」を、学校設定科目「探究科学」で実践することによって、学習支援を行った事例を紹介する。その際、教育データが活用され、Google クラスルームを用いた教育 DX によって資質・能力が育成され、「深い学び」が実現している生徒の姿も紹介する。また、本校作成の「探究的な学びに関するジェネリックスキルテスト」（以下ジェネリックスキルテスト）による、生徒のジェネリックスキルの変容の見取りについても提示する。

2 2 相互評価の充実

（1）相互評価の規準について

① 評価規準と育成したい資質・能力の関係

評価規準は、教員が意図する学習目標の具体化であり、表面的には育成すべき資質・能力との関連性が不明瞭に見える。しかし、評価規準を明示した相互評価を通じて、学習者は自己の思考を構築し、協働的な対話を通じて内省と修正を行う。このプロセスは、科学的リテラシーとジェネリックスキルの変容を促進し、育成すべき資質・能力の変容に寄与すると考える。

② 相互評価の階層

本校では相互評価に、以下の 3 つのステップを設定し、それぞれの特徴と役割があると考えます。

ステップ 1 授業での相互評価

このステップでは、生徒同士が評価規準や相互評価の結果を参照しながら、自身の記述や成果物を振り返り、修正を行う。

生徒が、他者からのフィードバックを通して、自己の理解

や表現を深化させ、学びの質を高める。

ステップ2 教員による生徒の変容の見取り

このステップでは、教員が授業において、生徒の資質・能力の変容を評価規準によって見取る。

具体的には、生徒が修正した記述を生徒と同じ評価規準に照らし合わせて見取り、フィードバックを行う形成的評価と、教員のフィードバックをうけてさらに修正をした最終的な成果物を評価し、評定に活用する総括的評価である。教員は、生徒の変容を把握し、指導の改善につなげると同時に、生徒の学習を支援する。

ステップ3 学校全体としての評価

このステップでは、学校全体で生徒の資質・能力の変容を評価する。具体的には、各教科・科目において、個々の生徒ではなく、クラス全体や学校全体で相互評価の事前・事後の評価規準の項目ごとの変容を把握し、次年度の指導改善につなげる。学校全体で生徒の成長を捉え、指導方法の改善に役立てる。

(2)「探究科学」(理数探究)における相互評価の活用

① 学校設定科目「探究科学」とは

「探究科学」は理数探究の代替であり、本校の中学校第1学年から高等学校第3学年の全生徒が履修し、自ら研究テーマを決めて探究活動を行う科目である(各学年2単位)。高等学校では理科と数学科の教員が複数で協働して指導にあたる。

② 評価規準の作成

評価規準の作成においては、育成したい生徒像を明確にすることが重要である。

本校では、全教員でSWOT分析を実施し、育成したい生徒像を共有した上で、それを反映した評価規準を、科学的リテラシーに関連する先行研究を基に作成した。

③ 相互評価の進め方

高等学校第1学年の1学期に実施する、問を立てる場面での「課題と仮説の設定」を例に、相互評価の進め方を表1に示す。なお、探究活動のすべての場面の評価規準、年間計画、使用するワークシートやフォーム、学習意識調査項目などは本校HPに掲載している。

④ 評価におけるDX

生徒が主体的かつ研究レベルの高い問いをたてることがで

表1 相互評価の進め方

評価の手順	ポイント
①個人による「課題と仮説」の記述(1回目)	自身の進路や関心のあるSDGsなどを踏まえ、先行研究に基づいて記述する。
②自己評価(1回目)	①の記述を評価規準を用いて自分で評価する。規準を満たせば1点、満たさなければ0点。良い点と改善点を記述でも評価する。
③相互評価(1回目)	①の記述を班のメンバーが同一の評価規準を用いて評価する。
④グループでの相互評価結果に基づく議論	相互評価の結果と評価規準を参照し、追加の文献調査をし、改善策について議論する。
⑤個人による「課題と仮説」の再記述(2回目)	相互評価の結果、評価規準、班での話し合いを参照して、振り返り、自己の記述を修正する。
⑥自己評価(2回目)	⑤の記述を評価規準を用いて、再度評価する。
⑦教員による形成的評価	⑤の記述を教員が同一の評価規準を用いて評価する。良い点と改善点を記述でも評価し、生徒にフィードバックを提供する。
⑧班での教員評価を参照した議論	教員からのフィードバックを参照し、修正案について班で検討する。
⑨個人による「課題と仮説」の再々記述(3回目)	教員からのフィードバックと班での議論を参照し、3回目の記述を行う。
⑩教員による総括的評価	⑨の記述を教員が同一の評価規準を用いて評価し、必要に応じてフィードバックを提供する。

きるように、ICTを活用して、評価規準を明示し、グループ内でお互いに評価し合い、協働する場面として相互評価を設定した。特に次の4点を工夫した。

a. クラウド上で課題と仮説の記述、評価規準と相互評価の結果を共有すること。

相互評価をICTを活用して実施することで、生徒は他者の意見や評価を全員と共有できるようにした。教員は即時にデータを解析できるため、次の指導の方向性を客観的データに基づいて決定できる。

b. 他者から学び、自己の意見を修正できる活動を位置づけること。

自らが考えを深めていくために他者の意見を参照し、より妥当な意見として修正できるようにした。教員も生徒同士の相互評価の後にフィードバックをすることで、形成的評価となる。

c. クラウド上で修正した個人の考えを共有し、振り返り、班での課題と仮説を設定すること。

修正後の個人の考えをグループで共有し、班の課題と仮説を設定することで、学習者はさらに自らの考えを深いものにすることができるようにした。

d. 教員間の情報交換のプラットフォームとして「探究科学」のGoogleクラスルームを位置づけること。

教員にとっては、データは自動で転記・集計されるため、仕事削減となり業務の効率化ができた。データは教員同士でも共有ができ、学級状態がわかり、きめ細かな指導に活用することができた。管理職や学年主任など担当教員以外も含めてチームとしての支援が可能となり、情報交換のプラットフォームともなった。

⑤ 生徒の記述の変化

生徒 A の 1 回目から 3 回目の記述、同じ班の生徒 B からの記述での評価、および生徒の 2 回目の記述に対する教員のフィードバックの例を表 2 に示す。

表2 仮説の設定における生徒Aの記述の変化

1回目の記述	奈良県の伝統野菜であるヤマトマナの亜鉛含有量を増やすことができる。
1回目の記述に対する、生徒Bの記述での評価	仮説を立てるときに複数の先行研究から根拠となるところを読み取り、多角的な議論をするほうがいい。
2回目の記述	ヤマトマナを収穫3日前に亜鉛濃度を 5mgL^{-1} に調整し、生育が抑制されずに、亜鉛含有量を増加させることはできる。
2回目記述に対する教員の記述での評価	良く調べられています。新規性も記載するといいです。多角的な研究として、葉の色(クロロフィル量)や質量も測定して、亜鉛が増えても成長に支障がないと示す研究も同時進行するといいですね。
3回目の記述	ヤマトマナの種子を水耕栽培用のウレタンスポンジで発芽させ、水耕液を入れた容器に移し、5週間水耕栽培する。水耕液には硫酸亜鉛を用いて、亜鉛濃度と亜鉛を添加する日数を変えて実験を行い、ヤマトマナの亜鉛含有量が增加する最適な栽培条件を確立する。 ヤマトマナの収穫3日前に水耕液の亜鉛濃度を 5mgL^{-1} に調整して栽培した場合の、新鮮重、クロロフィル量を測定する。クロロフィル量はSPAD計を用いて調べること、生育が抑制されないことを確かめ、かつ最も亜鉛含有量を増加させることができると考える。 ヤマトマナで亜鉛を増加した研究はない。

生徒 A は農学を通じた社会貢献に関心があり、進路と関連した地域課題の解決をしようとする中で、他者との関わりから、奈良県の伝統野菜ヤマトマナを高亜鉛含有量にできれば、科学的な視点から付加価値を高めることができると仮説

を設定し、さらに研究のレベルを高めるために多角的な実験が必要であると理解を深めていった。

問いを立てる場面で、同じ班の生徒 B と教員からの評価を参照したことで、より評価規準を意識し、妥当な意見として修正することができた。これは、評価規準を明示した相互評価を ICT を活用して実施することで、積極的に課題解決をしようとしたと考えることができる。

また、教員にとっても、2 回目記述の段階で生徒の学びがどのような状態かを評価することで、今後の指導の方向性をより明確にすることができた。

(3) 学校全体としての評価

高等学校第 1 学年全生徒を対象とした仮説設定場面における記述内容の分析結果として、1 回目と 2 回目の記述を比較し、評価規準に基づく得点に有意な向上が見られた項目を表 3 に示す。

表3 仮説設定場面における学年全体での 1 回目より 2 回目の記述で有意に得点が向上した項目(抜粋)

項目	小項目	有意確率(両側)P値	Z
仮説が示され、必要な根拠があがっている(仮説記述の内容と議論の構造)	①仮説の説明に必要な先行研究が明記されているか。	0.002	8.471**
	②「(先行研究の結果)より、(仮説)と考えた。その理由は(先行研究の考察)だからである。」といった構造になっているか。	0.004	7.579**
	③多角的な研究・議論が行われているか。	0.001	6.750**
	④研究の新規性を述べているか。	<0.001	12.071**
	⑤文献リストの書き方どおりに記述できているか。	<0.001	13.136**

(McNemar 検定 SPSS 27 * $P < 0.05$ ** $P < 0.01$ ns $p > 0.05$)

この結果から、仮説設定の場面において、相互評価を取り入れた学習活動が、生徒の科学的リテラシーの向上に寄与したことが示唆される。

このように、探究活動の全ての場面で全生徒の得点の変容を客観的に見取することで、学校としての事業の成果と課題を

明らかにすることができる。

また、相互評価の取り組みを継続して進めることで、評価基準の得点の変化から、客観的に生徒の資質・能力が向上し、天井効果になっていると考えられた場合には、評価基準を上方修正でき、学校の事業をエビデンスに基づいて改善することができる^{*2}。

3 ◆ ジェネリックスキルの変容

本校 SSH の生徒のジェネリックスキルの変容について、京都市立芸術大学美術学部・大学院美術学研究科 准教授 堀田千絵氏、臨床心理士・公認心理師 森本 哲平氏 とともに「探究的な学びに関するジェネリックスキルテスト」を作成し、研究を進めてきた^{*3}。ここでは堀田ら（2023）の研究から、生徒のジェネリックスキルについて紹介する。

（1）ジェネリックスキルテスト作成と実践および各因子

本校教員と協力し、ジェネリックスキルを9つの要素（関係を紡ぐ力、向社会的態度、自己の強さ、主体性ある実行力、柔軟さ・しなやかさ、創造やイメージ、他者尊重と信頼、認知にかかわる力、探究する力）と定義。STEAM 教育の考え方も加え、質問紙調査を実施した。この研究では、ジェネリックスキルの学年差分析を中心に SSH の教育効果を検証した。中高6年間のジェネリックスキルの変化を捉え、各因子（論理性、創造性、セルフ・コンパッション、倫理観、好奇心、レジリエンス、勤勉性）の学年ごとの平均値を比較した。

（2）ジェネリックスキルテストの分析結果

分析の結果、論理性、創造性、勤勉性の3因子で、中学生よりも高校生の方が高い能力を示した。特に、論理性は高校1～3年生が中学1年生より、高校2年生が中学3年生よりも有意に高かった。創造性は高校1年生と3年生が中学3年生よりも有意に高かった。勤勉性は高校2年生が中学1年生よりも有意に高かった。

これらの結果は、本校の「探究科学」を中核とした SSH の活動が、生徒の論理性、創造性、勤勉性の発達に貢献している可能性を示唆する。本校の探究活動を通して、論理的思考力、創造力、粘り強く課題に取り組む力が育成されていると考えられる。

一方、セルフ・コンパッション、倫理観、好奇心、レジリエンスの4因子では有意な学年差は見られなかった。これらの因子は、SSH の活動よりも、生徒の個人的特性や家庭環境の影響を受けやすい可能性も考えられる。

今後の研究では、これらの点を考慮し、SSH の活動内容と生徒のジェネリックスキルの関連性を詳細に検討する必要がある。

4 ◆ おわりに

評価基準を明示した相互評価は、学習者が自身の学びを客観的に捉え、自己の意見を修正することで、課題解決への挑戦と学習意欲を高める有効な手段である。また、ICT 活用により、相互評価の過程と結果が瞬時に共有され、教員の指導向上にも繋がることが示唆された。特に、評価における DX は、相互評価を充実させ、学習者のジェネリックスキル育成、学校全体の評価と改善に貢献する可能性を示している。

現在、重点枠の連携校19校と多面的評価の研究を進めており、多くの学校で評価における DX の推進によって、評価における主体的、対話的で深い学びを充実させていく。❖

参考文献

- *1 デジタル庁、総務省、文部科学省、経済産業省「教育データ活用ロードマップ2022.1.7」2025年3月4日閲覧
<https://www.mext.go.jp/kaigisiryoo/content/000159621.pdf>
- *2 生田依子(2022)「学習意欲を高める「探究科学」の評価-継続した取り組みによる科学的リテラシーの向上と評価基準の上方修正-」『理科の教育』No.836, 41-43.
- *3 堀田千絵・森本哲平・河合知子・阪田安弘・山田隆文・生田依子・小川香・谷垣徹・土山敬子・中本ふさよ・津田恭充(2023)「スーパーサイエンスハイスクール(SSH)校におけるジェネリックスキルの横断的検討」『京都市立芸術大学紀要』No.68, 39-51

Ⅲ 地域に根ざした評価の在り方からの授業改善

～ 栃木県那須地区の取り組みにおいて ～

栃木県那須塩原市立東那須野中学校 教諭

熊田 憲朗 / くまだ のりあき

1987年、栃木県黒磯市（現那須塩原市）生まれ。東京学芸大学教育学部初等教育教員養成課程理科選修卒業。大田原市立川西小学校教諭、大田原市立若草中学校教諭、那須塩原市立西那須野中学校教諭を経て、2022年4月より現職。



1 ◆ 本稿の概要

栃木県那須地区（大田原市、那須塩原市、那須町）の中学校では、生徒の記述力向上や学習意欲向上を目的として評価の在り方を検討し、相互評価活動を導入している。生徒同士が他者の考察を評価し合い、改善点を具体的に指摘することで、論理的な文章記述能力やコミュニケーション能力を育てている。この活動の結果、生徒たちは主体性や対話力を発揮し、学習意欲や表現力が高まっていることから、学びの深さが増している。また、生徒が相互評価を通じて他者を認める姿勢を見せることで、ポジティブな学習環境が形成されている。本稿では、那須地区の中学校3校で行った取り組みの詳細と成果および考察について述べる。

2 ◆ 評価の取り組みに至る背景

那須地区の中学校では、那須地区中学校教育研究会を中心とし、毎年、生徒同士の積極的な意見交換を通じ、学力向上を目指した取り組みが行われてきた。具体的には、尾畑^{*1}の授業実践のような、ある学習課題について、生徒がホワイトボードを用いてグループでの話し合い活動をもとに解決していく、いわゆる特派員^{*2}方式のような学習方法が多く用いられてきた。これにより、生徒同士が互いに認め、助け合いながら、学びを進めてきた（図1）。

しかしながら、那須地区の生徒の能力の育成については、課題が見られることがわかってきた。2024年6月に、那須地区から抽出した中学校3校の理科を担当する教師3名に、



図1 ホワイトボードを活用した授業^{*3}

Google foamを用いて、担当する生徒の理科の授業における特徴を把握するためのアンケートを行った。担当する生徒の課題について選択式で回答を求めたところ、「生徒の思考力・判断力・表現力に課題がある」および、「論理的な文章記述能力に課題がある」との共通した回答が得られた。一方で、生徒の学習の取り組みの特徴について自由記述で回答を求めると、「どの生徒も授業に意欲的で、実験・観察を積極的に行うことができる。」や「理科以外の教科でも教師からのコメントを楽しみにしており、それを励みに頑張る生徒が多い。」「素直な生徒が多く、授業での取り組みは良い。また、お互いに協力できる生徒が多い。」など、3校の生徒とも実験や観察など授業の取り組みに積極的であることや、話合って課題を解決することができることも回答として得られた。3校のどの生徒も、思考力・判断力・表現力および論理的な文章記述能力については育成の必要がある一方で、学習に前向きに取り組みたい思いがあることがわかった。

続いて、生徒の実態を把握するため、対象の中学校3校の3年生131名にGoogle foamを用いてアンケートを行った。6件法による質問「あなたは、考察を書くことに自信がありますか」に対しての結果は、肯定的回答が49.6%と半数に満たなかった。その理由については、「結果から自分の考えをまとめることが苦手だから」や、「どう書くのが正解

かわからないし、合っているか自信がないから」という回答があった。「どうしたら、より自信をもって考察を書くことができるようになると思いますか」の質問に対しては、「他の人と話し合う」や「考察を書きやすいように例やヒントがほしい」などの回答があった。生徒は考察を書くことに自信がなく、書き方を知りたいと感じていることや、他者と協働したり例やヒントを基にしたりして考察を書くことが有効だと感じていることがわかった。

そこで、3校の生徒に対し、3校それぞれの教員が理科の授業における考察記述に対しての相互評価活動を導入し、生徒の記述力向上や学習意欲の更なる向上を共通して目指すこととした。生徒相互による学習としての評価となる活動を行うことで、生徒個々にとって主体的、対話的で深い学びとなるようにし、これが3校共通して達成できることを目指した。

3 ◆ 取り組みの詳細と成果

(1) 方法

題材は、中学校 3 年生第 1 分野、金属イオンの学習である。1 時間目に、銅と亜鉛の金属板、および銅と亜鉛のイオンを含む水溶液を用いて、どちらがよりイオンになりやすいかを調べる実験を行い、1 回目の考察の記述を行った。2 時間目に、前時に書いた考察をスプレッドシート（図 2）に入力し、自己評価・他者評価を行った。その結果を基に、2 回目の考察記述と再度自己評価・他者評価を行った。最後に、2 時間の学習の振り返りと考察に関する意識調査を行った。

[illegible]

図2 スプレッドシートの画面の例

生徒が考察するために、以下の課題を与えた。

【考察課題】亜鉛と銅ではどちらがよりイオンになりやすいか考察しよう。

相互評価のポイント評価は、以下の評価規準で行った。

【考察の評価規準】

- ① 亜鉛と銅ではどちらがイオンになりやすいかが書かれているか(目的に合っているか)
- ② 亜鉛板に硫酸銅水溶液を加える とうなるかが書かれているか(必要な根拠があるか)
- ③ 銅板に硫酸亜鉛水溶液を加えるととうなるかが書かれているか(必要な根拠があるか)

(2) 生徒の学習意欲に関する成果

3校の生徒の学習意欲は以下の通り向上が見られた。

学習意欲の向上について調べるため、授業後に3校の生徒131名にGoogle foamを用いてアンケートを行った。6件法による質問「あなたは、考察を書くことに自信がありますか」に対しての結果は、授業前は肯定的回答が49.6%であったのに対し、授業後は82.4%へと向上した。また、6件法による質問「あなたは、理科の実験や観察での考察の書き方はわかりますか。」に対しての結果は、授業前は肯定的回答が64.9%であったのに対し、授業後は86.3%に向上した。これらの傾向は3校それぞれにおいても同様に見られた。このことから、3校の生徒の学習意欲がより一層向上したことがわかった。

生徒が授業後に記述した感想から、学習意欲の向上について調べた。131 件の 3 校の生徒の感想を分類すると、「友達の見聞を聞いて改善できた」という趣旨の感想が最も多く 45 件、「考察の書き方がわかった」という趣旨の感想が 29 件、「他の人の考察や考えを参考にできた」という趣旨の感想が 24 件など、肯定的な感想は全体の 95% であり、学習に意欲的に取り組んだことがわかった。以下に生徒の感想例を示す。

実験のときに同じ班の子たちと話し合って解決して、それを詳しく考察に書いて良かった。1人で考えるときは違って、深く理解できた。

自分の考察にアドバイスを貰うことにより、2回目の考察が遥かに良くなった。多少うまくいかなかったところはあったが、今回のような授業はもう少し有ってもいいと思った。

授業後に3校の理科を担当する教師3名に、Google foamを用いて学習の前後で生徒の学習意欲に変化があったかアンケートを実施した。3名とも、学習の前後で、「生徒の学習意欲に変化があった」と回答していた。どのような変化があったか自由記述を求めると、以下のような回答があった。

お互いに評価することで、自分の考察が認められる場面があった。友達から良い評価を受けて、うれしそうにしている生徒が多く見られた。
理科を得意教科に挙げる生徒が増えた。
記述をよりよくしようという意欲が見え、他者に意見を積極的に求めるようすが見られた。

(3) 生徒の表現力に関する成果

3校の生徒の表現力は以下の通り向上した。

生徒の相互評価のポイント評価の○の数の割合を調べると、1回目の○の数に対して2回目の○の数の方が①～③のすべての評価規準において向上していた(表1)。特に、評価規準②と③のポイントが10～15%程度向上していた。生徒の自己評価、他者評価の妥当性を調べるために担当教師も同様の評価規準で生徒の2回分の考察を全て評価した。すると、教師の評価も2回目の方が①～③のすべての評価規準において向上していた。特に、評価規準②と③においてはポイントが20%程度向上していた。これは、評価を経て生徒自身が改善点を自覚したためであると考えられる。相互評価活動により、課題である生徒の表現力が向上したことが証明された。

表1 考察記述のポイント評価の変化 (考察数 131)

		評価規準①	評価規準②	評価規準③
	評価	○の割合	○の割合	○の割合
自己評価	1回目	91.6%	83.2%	79.0%
	2回目	99.2%	95.8%	95.0%
他者評価	1回目	91.3%	80.1%	82.1%
	2回目	97.1%	93.3%	92.9%
教師評価	1回目	93.0%	70.3%	66.4%
	2回目	95.3%	88.3%	85.9%

コメント評価により、具体的に生徒の考察が改善した例について紹介する。生徒Aの書いた1回目の考察文が、生徒Aによる自己評価コメント、生徒Bと生徒Cによる他者評価コメントにより改善した例を以下に示す。

【生徒Aの考察1回目】

亜鉛の方がイオンになりやすい。硫酸銅水溶液をたらすと、色が黒っぽく変化したから。



【生徒Aによる自己評価コメント1回目】

「反応のようすが書かれていない」

【生徒Bによる他者評価コメント1回目】

「それぞれの水溶液を加えたときの反応が書かれているとgood! 結果はとてもわかりやすい」

【生徒Cによる他者評価コメント1回目】

「反応のようすが書かれていないので書くといいと思う」



【生徒Aの考察2回目】

亜鉛板に硫酸銅水溶液を加えると垂らした部分が黒っぽくなった。また、銅板に硫酸亜鉛水溶液を加えると反応が何も起こらなかった。この結果から亜鉛のほうがイオンになりやすいと言える。

(下線部は相互評価を経て明確な根拠が追記された箇所)

以上のように、生徒Aの考察文は、相互評価活動により改善され、表現力が向上した。

1回目の考察文から2回目の考察文で表現の改善をもたらしたコメントは、他にも数多く見られた。1回目の自己評価コメントで表現の改善を求めるコメント53件のうち44件が、また1回目の他者評価コメントで表現の改善を求めるコメント87件のうち66件が表現の改善に作用したことを担当教師が確認し、相互評価活動のコメント評価が、課題である生徒の表現力向上に有効であると証明された。

4 ◆ 考察

3校で共通した成果が見られた理由について、以下の通り考察する。

(1) 3校で共通した実践を行うことのやりやすさ

那須地区の3校で共通した成果が得られたのは、学校を越えた実践を行いやすかったためである。その要因については、主に以下の3点が挙げられる。

- ① 日頃の疑問や課題について共有する場があること
- ② 管理職の後押しがあること
- ③ 情報共有がしやすいICT環境があること

まず、①の日頃の疑問や課題について共有する場について説明する。那須地区の教員同士は、互いに親密な関係で、日頃の疑問や課題を共有できている。那須地区理科部会の毎年の研究授業に向けて、指導案検討会が行われる。地区全体の課題を解決するための提案となる授業であるため、検討会では日頃の課題について共有する場となる。また、各市町独自の取り組みにより、授業を比較的気軽に参観する機会や、日頃の学習指導における課題について相談する場もある^{*4}。学習指導について語り合うさまざまな場があることが、今回の実践を実行に移しやすかった要因の1つであるといえる。

次に、②の管理職の後押しがあることについて説明する。今回のような学校を越えての取り組みは、2023年にも那須地区の5校で行っている^{*5}。その際には、地区の理科部会の代表である管理職が、5校の管理職に連絡を取ったり、指導方針について検討の場を設けたりするなど、強力な後押しがあり動きやすかった。現場の教員としては、管理職の後押しがあることが、学校を越えた実践のために大変ありがたかった。

そして、③の情報共有がしやすいICT環境があることについて説明する。那須地区小中学校の全職員・児童生徒には、1人に1つのGoogleアカウントが与えられている。ドライブを用いたデジタル教材の共有やWeb会議、アンケートの実施が地区で共通して行えたことがとても便利であった。

(2) コミュニケーション能力を発揮する場の設定

今回の実践では、他者の考察文を評価し、意見を交換した。他者と同様に、自分も考えて答えた考察課題だからこそ、他者の考察文も相手意識をもって真剣に評価できるのではないかと考える。相手意識があることで、他者を思いやった言葉でやり

とりがなされ、コミュニケーションの活性化につながったと考えられる。相手の改善点を指摘しない歯の浮くような言葉ばかりでは良くないが、評価基準を設定することで改善のポイントがわかりやすくなり、具体的な意見を出しやすくなったことが成果につながったと考えられる。

(3) 表現力育成のための工夫

評価の時間をじっくり確保したり、コメント評価で具体的な改善の意見を交換したりすることが、考察文の改善をもたらし、成果につながったと考えられる。考察文の改善点について生徒が自覚的に修正することで、主体的に学習に取り組むことができるようになったと考えられる。授業後の生徒への感想には、「きちんと考える時間を確保することで、自分の考えにいろいろと付け足すことができるんだと思いました」とあった。また、「自分の考察に意見をもらえる機会が今まで少なかったので良い機会になりました」などの記述があった。

5 ◆ まとめ

地区全体で、相互評価活動のような学習としての評価となる活動を通じて、他者を認める姿勢を生み出すことにより、ポジティブな学習環境が形成され、新たな学びの価値が創造されている。学習活動を行う中で生徒が主体的に学び、対話を行っていく。そうすることで学びの改善および次の学習へ意欲的に向かうという正のスパイラルを形成できるようにしていきたい。さらなる学びの深まりを生むため、今後も那須地区全体で研究を重ねていきたい。



参考文献

- *1 尾畑宏(2015)「私たちは、ワクワクする 楽しい授業がやりたい 生徒が協働して主体的に課題を解決しようとする学習の実践」『理数啓林』No.8, 17-18.
- *2 神代龍吉(2019)「話し合い学習法-主体的,対話的で深い学びのために」『薬学教育』第3巻
- *3 「授業実践記録(理科) 中学生からみた「小集団による課題解決型学習」実践記録 | 啓林館」(最終閲覧日:2025年3月29日)<https://www.shinko-keirin.co.jp/keirinkan/tea/chu/jissen/rika/201409/index.html>
- *4 「那須塩原市教育行政の概要」p48(最終閲覧日:2025年3月29日)<https://www.city.nasushiobara.tochigi.jp/material/files/group/36/yoran3.pdf>
- *5 熊田憲朗(2023)「相互評価活動による表現力の向上 ～凸レンズの実像のでき方の説明を通して～」第70回全国中学校理科教育研究大会東京大会第二分科会

IV 高等教育における相互評価を通じた 資質・能力の育成

福岡教育大学 副学長・教授

伊藤 克治 / いとう かつじ

1996年九州大学大学院理学研究科博士後期課程化学専攻修了。同年より福岡教育大学助手、同大学講師、助教授、准教授を経て、2008年より教授。この間、2013年～2015年 同大学副理事兼任、2016年～2018年 同大学附属久留米小学校・中学校校長兼任、2025年から同大学副学長（学術基盤担当）兼任。専門は有機合成化学、理科教育、科学教育。



1 教育現場を取り巻く背景

2012年に中央教育審議会（中教審）から「新たな未来を築くための大学教育の質的転換に向けて～生涯学び続け、主体的に考える力を育成する大学へ～」と題する答申^{*1}が出され、「従来のような知識の伝達・注入を中心とした授業から、教員と学生が意思疎通を図りつつ、一緒になって切磋琢磨し、相互に刺激を与えながら知的に成長する場を創り、学生が主体的に問題を発見し解を見いだしていく能動的学修（アクティブ・ラーニング）への転換が必要である。」と述べられている。その後、2018年には「2040年に向けた高等教育のグランドデザイン」の答申が出され、全学的な教学マネジメントの確立と教育成果の可視化等が述べられている^{*2}。

一方、初等中等教育段階では2017年に小学校と中学校、続いて2018年に高等学校の学習指導要領が告示された。今回の改訂では、学習する子供の視点に立ち、育成を目指す資質・能力の要素が三つの柱で整理され、観点別評価はそれに合わせて「知識・技能」、「思考・判断・表現」、「主体的に学習に取り組む態度」の三観点に整理された^{*3}。さらに2019年に公表された「児童生徒の学習評価の在り方について（報告）」^{*4}では、自己評価・相互評価の状況も含め、教科等の特質に応じた多様な方法を工夫するものと述べられている。なお、「主体的に学習に取り組む態度」の評価においては、粘り強く学習に取り組む側面と自ら学習を調整しようとする側面の二つの側面から評価することが求められている。このように、現在の教育現場では、学校種を問わず「主体的な学び」と「評価」が重要なキーワードであることがわかる。

2 大学生の実態と相互評価導入の経緯

東京大学が2007年に行った全国大学生調査結果^{*5}によれば、論理的に文章を書く力について、「大学の授業が役立っている」については、肯定的な回答が42.9%、「自分の実力について」は否定的な回答が70.5%であった。なお、2018年に行われた第2回の調査では「大学の授業が役立っている」については、肯定的な回答が58.1%に上昇しており、この間の各大学における授業改善で一定の成果があったと認められるが、「自分の実力について」は否定的な回答が66.6%であり、学生の自己効力感については未だ課題が残されている。

2016年以前に筆者が担当していた実験の授業では、授業時にレポートの書き方について説明をしていたものの、授業後に提出されるレポートは内容や構成が学生によってまちまちであった。学生自身も、作成するレポートの内容と構成について悩む姿も見られた。そこで、学生が評価規準を拠り所にして学び合う場を設定すれば、学生が論理的に文章を書く力が向上するものと考えた。このような考えの下で、筆者が担当している実験の授業に相互評価活動を取り入れ、年度ごとに内容を工夫しながら実践を重ねてきた。本稿では、これまでの実践内容と成果を紹介する。

3 相互評価の実践例

(1) 実験レポートの相互評価（試行実施）

最初の実践は、2017年度に「有機化学実験」の全16回（各

135 分、受講者 8 名) の中で試行的に 1 回行った。具体的には、筆者が作成した評価規準表(表 1)を用いて、学生が実験レポートの相互評価を行った。このときに用いた自己／他者評価シートへの学生の記入例を図 1 に示している。表 1 の小項目ごとに、満たしていれば 1 点、満たしていなければ 0 点の 12 点満点とし、コメント欄にコメントを記入させた。まず、評価規準表に沿った自己評価を行わせ、その後、ペアになって相互評価を行わせた後、再び自己評価を行わせ、合計 3 回、評価シートに記入させた。

表 1 評価規準表

項目	小項目
内容が正しい	①主張の内容が正しいか。
	②用語の誤用はないか。
	③必要なキーワードが含まれているか。関連のないことが含まれていないか。
適切な文章表現をしている	④主語と述語の対応・誤字・脱字・助詞・接続語等の誤りはないか、読点は適切か、読みにくいのか。
	⑤1つの文章が長すぎたり、多くの情報を詰め込み過ぎていないか。
	⑥実験結果や事実を基に記述しているか。
論理的に表現している	⑦自分の考えと調べて分かったことを記述しているか。
	⑧必要な理由や根拠をあげて記述しているか。
	⑨論理的な文章を記述しているか。
	⑩客観的な文章か。
	⑪必要な引用文献を挙げているか。
	⑫レポート全体の構成は問題ないか。

項目	内容が正しい				適切な文章表現をしている		論理的に表現している						合計
小項目	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	
得点	/	/	/	/	/	0	0	0	/	/	0	0	
コメント	この実験レポートは適切な内容と簡潔に記述されていると思う。 実験結果も写真に写すか、写真に写さなければならなかったと思う。これは自分の考えと調べて分かったことを記述している。必要な理由や根拠をあげて記述している。論理的な文章を記述している。客観的な文章か。必要な引用文献を挙げている。レポート全体の構成は問題ない。												6 / 12点

図 1 自己／他者評価シートの記入例

当然とも言えるが、このような相互評価後に修正・提出させたレポートは、前年度よりもきちんと内容と形式が整っていた。4 件法の事後アンケートでは、「レポート全体の構成をきちんとできるようになった」の肯定的回答は 100% であったが、「論理的な文章を記述できるようになった」は 63% であった。当初は予想していなかったが、「評価することによってレポートに取り組む意欲が高まった」の肯定的回答が 100% であった。自由記述のアンケートでは、「他者や自分のレポートを評価することにより、自分の記述したものを客観視できる」、「他人のレポートを読むということも良い刺激になったし、自分のレポートが同じ学生の目線から読まれ、コメントされるということにさらに大きな価値があった」

という肯定的な記述が見られた。さらに、「他者の評価にもっと時間をかけて、調べながら添削できたらもっと実りのある活動になると思った」、「自分で評価規準を定め、他者を評価する練習も行ってみたい」という記述も見られた。なお、「評価が難しかった」の回答が多かったことが改善点として残された。学生にとっては、評価規準表を用いた相互評価は初めての経験だったので、仕方なかったともいえる。しかしながら、1 回の相互評価を行っただけでも有効性が見られたことは想定以上であった。

(2) 実験レポートの相互評価(本格実施)

翌年度の 2018 年度は、試行実施の結果を踏まえて、2 回の授業で相互評価を行った。第 1 回では、まず学生個人に評価規準を考えさせ、続いてグループ協議を行わせて整理された評価規準を全体で共有した。全グループから出てきた評価規準をまとめると、教員が作成した評価規準表(表 1)の③と⑤以外は全て含まれていた。授業冒頭で、「レポートに求められる評価規準は何か?」を学生に問いかけたときは困惑するようすが見られたが、学生から出てきた評価規準は教員が作成した評価規準とほぼ一致していることに納得していた。このように学習者に評価規準を考えさせることについて、小学校、中学校、高等学校での実践例が報告されており、学習者の主体性や自己調整力等の向上の点で有効であることが明らかになっている。なお、学生から出てきた評価規準のうち表 1 に無いものとして、「実験の目的は明確か」があった。今回の評価規準表には入れていないが、授業を構想する際に実験の目的は授業の主眼につながるため、目的を明確にすることは大切であることを学生に伝えた。

評価規準を教員と学生で共有した後、簡単な演示実験を見せて考察を書かせた。今回は考察のみであるため、表 1 の評価規準表のうち、⑦、⑪、⑫を除く 9 項目について相互評価を行わせた。図 2 に実際に学生たちが相互評価を行っ

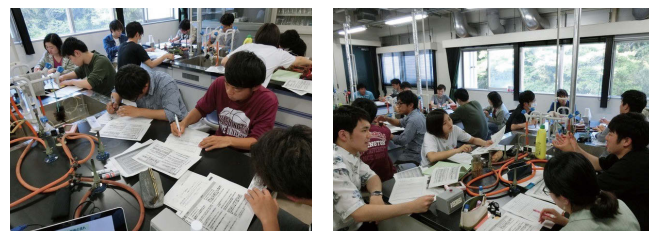


図 2 対面での相互評価のようす

ているようすを示している。自己評価と他者評価シートを真剣に記入し（図2左）、その後、グループで評価内容について活発に話し合うようすが見られた（図2右）。学生たちは、評価規準を意識していることで、抽象的・感情的な話し合いではなく、具体的・論理的に話し合うことができていた。

これを踏まえて、第2回に実験レポートの相互評価を行わせた。このときは、図1の他者評価シートのコメント欄を広げ、「良い点」と「改善を要する点」のそれぞれについて記入させた。記載内容が正しいか判断がつかない場合には、書籍やインターネット等で調べてからコメントさせるようにした。さらに、総合評価として「A（そのまま提出可能）、B（微修正を要する）、C（大幅な修正を要する）」のいずれかに丸印を付けさせた。この相互評価の結果を踏まえて、1週間後の授業までに修正したレポートを提出させた。他者評価の結果は、得点評価の平均が8.5点／12点であり、総合評価はAが20%、Bが60%、Cが20%であった。総合評価Cの20%は少し厳しい評価かと思ったが、提出されたレポートは全て適切に修正されており、相互評価を行っていなかった頃のレポートと比べると、全体的に質の高いレポートであった。

今回の事後アンケートを前年度の試行実施【上記の(1)の実践】後の事後アンケートと比較すると、「評価はスムーズに進んだ」の肯定的な回答は、以前の38%から今回は67%に向上した。また、「論理的な文章を記述できるようになった」の肯定的な回答は、以前の63%から今回は80%に向上した。今回は2回の相互評価を行ったので、評価の経験を重ねると肯定的な回答が増えることがわかる。自由記述の事後アンケートでは、「自分の考察をある観点から見ると全く足りていなかったことがわかり面白かった」、「自分と同じことをしている人と意見や目の付けるところが異なるのが面白い」の記述があり、他者評価で改善点を指摘されても、自分の新たな気づきに意味を感じ、楽しんでいることが印象的であった。このことは、「評価することは楽しかった」の肯定的な回答が以前の63%から今回は93%に向上していたことから窺える。また、「事前に評価の仕方やそれに基づく考察の組み立て方を学んでいたため、レポートを書く筋道が立てやすかった」との自由記述もあった。前時に相互評価を一回経験していることで、自己評価観をもってレポートを作成できたことがわかる。さらに、「実際の教育現場で、他

者のものを評価することは多くあると思うので、練習の一環として、やって良かった」の記述もあり、教員を目指す学生がここまで考えていることを嬉しく思った。

(3) 遠隔授業における実験レポートの相互評価活動

本学では、新型コロナウイルスの感染拡大のため、2020年5月から全ての授業を遠隔授業で実施することになった。当初の通信環境の関係で、本学ではGoogleのClassroomを使ったオンデマンド型のオンライン授業が基本とされたが、教員も学生も初めての経験であった。実験の授業では、教員が用意した動画を視聴させてレポートを提出させるようにしたが、これまでの実践を踏まえて、遠隔授業でも相互評価はできるものと考えた。実験テーマは学生が自宅でできるようなものをこちらで設定し、使う道具類と方法は容易に入手できるものを学生に考えさせた。自宅で実験を行った後にレポートを電子媒体で作成させ、Classroomに提出させた。対面授業で教員が説明していた相互評価の意味や進め方については、動画にして学生に視聴させ、その後、実際に遠隔でグループメンバーの相互評価をさせた後、修正したレポートを再提出させた。

事後のアンケート結果から、レポートに取り組む意欲の向上や、相互評価の価値についての肯定的回答率は高く、遠隔授業でも対面授業と同等の効果が認められた。一方で、「評価することは楽しかった」は、以前の93%から71%へ低下した。また、「評価した学生の記述の向上に役立った」の肯定的回答は、以前の100%から79%へ低下しており、お互いに顔が見えない遠隔授業特有の課題も明らかになったが、「論理的な文章を記述できるようになった」の肯定的な回答は、以前の80%に対して今回は86%であり、遠隔授業でも学修効果は認められることがわかった。特に、相互評価シートやアンケートを電子化できたことは大きな成果であった。これまでの相互評価は、図1にあるように学習者が紙に手書きで記入するものであったが、電子化したことで授業時間外の学習時間でやり取りが可能になった。さらに、教員が相互評価のコメントやアンケート結果の集計を直接パソコンで統計処理やテキストマイニングをすることも可能になった。コロナ禍のときに児童生徒一人一台端末が整備されたこともあり、時間的制約を受けやすい初等・中等教育の学校教育現

場でも相互評価の活動時間を確保しやすくなったことや、教師がデータ処理をしやすくなったことは大きな進歩である。

(4) 課題の設定および研究発表における相互評価活動

理科の探究の過程において、自然事象に対する気付きから課題を設定することは、児童生徒にとってハードルが高いが、大学生も同様にハードルが高いように感じている。そこで、全15回の授業の中に、表2に示したような全7回のミニ探究活動を設定した。この

表2 ミニ探究活動の内容

うち、第3～4回で研究計画書の相互評価、第6回で実験レポートの相互評価、第7回で研究発表の相互評価を行った。

第1回	研究計画書の立案(1)
第2回	研究計画書の立案(2)
第3回	研究計画書の相互評価(1)
第4回	研究計画書の相互評価(2)
第5回	実験
第6回	実験レポートの相互評価
第7回	研究発表と相互評価

第3～4回では、まず個人で研究テーマとその遂行計画を作成させ、その後、テーマ設定と研究遂行に関する評価基準に沿ってグループ内で相互評価を行い、その結果をもとにグループ内で議論をさせ、グループで1つのテーマに絞った研究計画シートを作成させた。この相互評価では、複数のキーワードを挙げることや、興味・関心のある内容、また、研究方法が具体的に書けているかという評価で、若干点数が低い傾向が見られた。第7回ではグループ単位で発表を行わせ、自分のグループ以外の発表については、発表内容、発表方法、発表資料の項目に関する他者評価シートを記入させた。表3には課題設

表3 課題の設定に関するアンケート結果

	アンケート項目	p	
		中間	事後
①	普段の生活で見たり聞いたりする科学のニュースや話題に興味・関心がある	n.s.	n.s.
②	身の回りのものや現象を科学的な目で見ることができる	n.s.	**
③	日常的に科学のニュースや話題について自ら情報収集している	†	*
④	科学のニュースや話題に触れた時、自分が知らない内容があれば、それについて調べる	n.s.	n.s.
⑤	インターネット、書籍、論文等から必要とする情報を収集するのが得意である	n.s.	n.s.
⑥	自分が集めた複数の情報を整理してまとめるのが得意である	n.s.	n.s.
⑦	自分が知っている科学関連のニュースや話題について、どこまで解決されていて、どのような課題が残されているか知っている	n.s.	*
⑧	自分が知っている科学関連の課題に対して、自分ならどのように解決するか考えることがある	n.s.	*
⑨	科学(理科)の自由(課題)研究のテーマを自分で決めるのは得意である	n.s.	*
⑩	他の人が科学(理科)の自由(課題)研究のテーマを決めるために助言することができる	**	**

** $p < .01$ * $p < .05$ † $p < .10$ n.s. $p > .10$ $n = 20$

定に関するアンケートの分析結果を示している。「中間」は授業開始前と第4回が終了した中間時点での肯定的回答の変化、「事後」は授業開始前と第7回が終了した時点での肯定的回答の変化について、Wilcoxonの符号順位検定を行った結果である。中間の時点では⑩しか有意な上昇は見られなかったが、第7回まで終了した場合は、②、③および⑦～⑩で有意な上昇が見られた。なお、①と④については、それぞれ事後の肯定的回答が94%、82%と高いため有意差がないのは問題ないが、⑤と⑥はいずれも事後の肯定的回答が59%であり、改善の必要がある。事後のアンケートでは、視野が広がったことや自分に取り組んだ内容が深まったことに関する記述が多数見られた。これらのことから、研究発表会での相互評価は、多面的に問題を見出して問いを立てる経験になり、これによって課題設定力が高まったものと考えられる。

4 ◆ まとめ

以上述べたように、相互評価を通して論理的な文章の作成能力や課題設定力が高まることがわかった。なお、実践前は想定していなかったが、これらの能力向上を学生自身が実感して自己効力感が高まることで、主体性も上がってくることもわかった。さらに、学習者が相互評価を繰り返し経験しながら達成感を重ねることで、学習集団の課題遂行力と心理的安全性が一体的に高まることもわかってきた。このようなことから、探究活動に相互評価を取り入れることで、将来、教育者や研究者になる上で必要な資質・能力が身に付くものと考えており、今後、さまざまな学校種に応じた相互評価の取り組みが一層広がることを期待している。

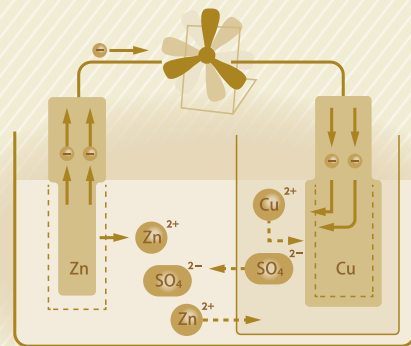
参考文献

- *1 中央教育審議会答申, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/1325047.htm (2025年3月現在)。
- *2 中央教育審議会答申, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/1411360.htm (2025年3月現在)。
- *3 文部科学省 小学校および中学校学習指導要領解説(平成29年告示)総則編, 高等学校学習指導要領解説(平成30年告示)総則編。
- *4 文部科学省, https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo3/004/gaiyou/1292163.htm (2025年3月現在)。
- *5 東京大学大学経営・政策研究センター(CRUMP)全国大学生調査 2007および2018。

【第7回】

電気エネルギーから
化学エネルギーへ

ー電気分解について



東京学芸大学 名誉教授／国際基督教大学 客員教授

鎌田 正裕 / かまた まさひろ

1959年生まれ。京都大学大学院時代の専攻は原子核工学で、もっぱら溶融塩系の電気化学を専門とした。京大助手、鳥取大学助教授を経て東京学芸大学に異動した後は、授業で使える実験教材やものづくり教材の開発に取り組んできた。これまでに、高等学校理科(化学、理数探究)の学習指導要領の改訂・作成作業に関わるとともに、小学校理科、中学校理科、高等学校理数探究基礎の教科書の執筆にも関わってきた。大学院の授業では、科学と非科学の違いを考えさせるために、オカルト科学(擬似科学)を題材に科学の素晴らしさを次の世代に伝えることにも取り組んできた。

はじめに

これまで電池の話を取り上げてきたため、電気化学イコール電池の化学だと感じている方も多かもしれません。確かに工業的には、電気化学の分野で電池に関するものが非常に多いのですが、電池と並んで重要なものに電気分解があります。覚えている方もいると思いますが、水や塩化銅、あるいは塩酸などの電気分解は中学校の理科にも登場します。例えば、水の電気分解は水(H₂O)を水素と酸素に分解しようとするもので、塩化銅の電気分解は塩化銅を分解して気体の塩素と金属の銅を得ようとするものです(図1)。

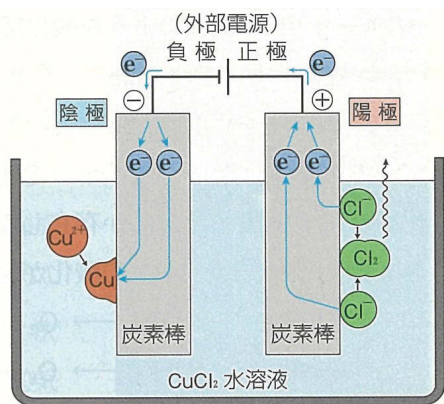


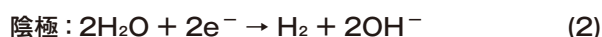
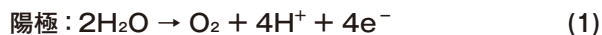
図1 電気分解の例(塩化銅の電気分解)

このように説明すると、電池と電気分解は全く異なるもののように聞こえますが、それぞれの電極で起こる反応については、流れる電流の向きが逆になることがあっても、基本的

な考え方に違いはありません。ただし、用いる用語に少し違いがあることを知っておいてください。電池の場合は、高い電位を示す側の電極を正極、低い電位を示す側の電極を負極と呼んでいましたが、電気分解の際には正極・負極という語は使用せず、高い電位側の電極(すなわち、外部電源のプラス極に接続された電極)を陽極、もう一方を陰極と呼びます。英語では、陽イオン(カチオン)を引き付ける電極をカソード、陰イオン(アニオン)を引き付ける電極をアノードと呼びますので、電池の正極はカソードですが、電気分解の陽極はアノードとなります。正極や陽極といった呼び方は、電流の向きがわかりやすいので便利なのですが、カソード・アノードのほうが電極で起きる反応に結びつけやすいので、慣れてくるととても便利です。

水の電気分解

水を入れた容器に炭素でできた電極を挿入し、電極間に一定の電圧を加えれば、次のような反応が進んで水の電気分解ができるように思えます。しかし、純粋な水そのものは電気を通さないため、電極に電源をつないでも電流は流れず、電極で反応は起こりません。



そこで、水の電気伝導性を補うために例えばNaOHを電解

質として加えると、今度は電極間に電流を流すことができ、それぞれの電極で次のような反応が進みます。



ここで、電解質を加えても電気分解の全反応(式(3)と(4)の辺々をたし合わせたもの)は、 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ と書くことができ、電解質として加えたNaOHそのものが反応によって増減しないことに注意してください。このような電解質を支持電解質と呼ぶことがあります。

活用される電気分解

電気分解という言葉から、何かを分解する操作というイメージが強くありますが、有機電解合成と言って、有機化学の分野では物質の合成のために電気分解を使うことも珍しくありません。したがって、電気分解の定義は「電気の働きを利用して物質を分解すること」ではなく、「外部から電気エネルギーを与えて化学エネルギーに変換する(物質の化学エネルギーを大きくすること)と考えたほうが誤解がなさそうです。水の電気分解は、単に水分子を分解する手段ではなく、水に電気エネルギーを与え、水よりも大きな化学エネルギーをもった水素と酸素を作り出すという意味です。このように考えると、「物質の持っている化学エネルギーを電気エネルギーとして取り出す装置」という電池の定義と真逆な関係になり、両者の関係を明確に表現できます。電気分解はさまざまな分野で活用されているため、用途のすべてをここで紹介することはできませんが、その代表例として、ソーダ工業における水素・塩素・水酸化ナトリウムの製造、金属の採取や精錬、そしてメッキに代表される金属の表面処理について説明します。

(ソーダ工業での利用)

ソーダ工業では、塩化ナトリウム水溶液を電気分解することで、水素・塩素・水酸化ナトリウムを製造します。ピーカーに入れた塩化ナトリウム水溶液に炭素電極を挿入し、電流を流せば、陰極で水素と水酸化ナトリウム、陽極で塩素が発生することはすぐに確かめられます。しかし、この方法では陰極付近で生成したNaOHが原料であるNaClと混ざってしまいます。工業的には、製品であるNaOHが原料のNaClと混ざるのを避けるため、昔は両極間にアスベストなどで作られた隔膜を設置していましたが、それでも原料と製品が混ざるのを完

全に防ぐことはできませんでした。しかし、前回お話ししたように20世紀後半にイオン交換膜が登場し、これを用いることで、図2のようにNaOHとNaClの混合を避けることのできる電解槽が開発され、現在ではこれがソーダ電解の主流になっています。

なお、食塩の電解といえば、海水をそのまま電解槽に入れて電気分解している人もいるかもしれませんが、ソーダ電解では原料として輸入した岩塩を使用しています。海水はNaClの濃度が低いことに加え、NaCl以外の物質も溶けていて、これらの物質の影響が無視できないためです。

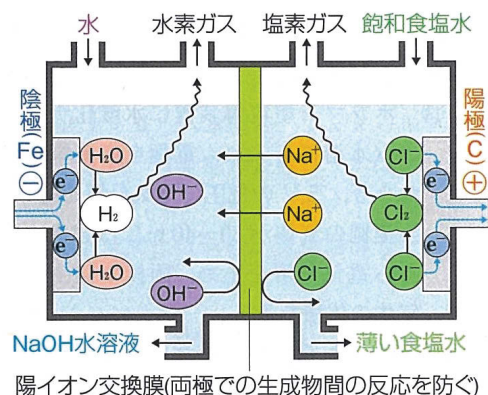


図2 イオン交換膜を利用したNaClの電解槽

(金属の採取・精錬)

多くの金属は酸化物の形で産出されるため、金属を得るためにはこれを還元する必要があります。鉄は溶鉱炉内で鉄鉱石と炭素(コークス)を高温で反応させ、熔融した金属として得られますが、多くの金属では、いったん酸などに溶かした上で、電気分解によって金属として回収する方法が用いられています。また、銅のように化学的な方法で鉱石から粗銅を取り出した上で、その純度を高めるために電気分解を用いることもあります。

電解で採取される金属として有名なものにアルミニウムがあります。図3にはアルミニウムの電解槽の構造が示されています。この場合は、酸などの水溶液ではなくイオン融体である熔融塩に原料(ボーキサイト)を溶かし、これを電気分解します。イオン化傾向を思い出してもらえばわかると思いますが、アルミニウムは水素よりもイオンになりやすいので、例えば塩化アルミニウムを溶かした水溶液に電極を挿入して電気を流しても、陰極では水が分解してできた水素が発生するだけで、アルミニウムが金属として析出することはありません。そこで、水よりも分解しにくく、かつアルミニウムイオンを溶かすことのできる熔融塩(氷晶石: Na_3AlF_6 + フッ化アルミニウム: AlF_3)

を使用します。アルミ缶のことを電気の缶詰などと呼ぶことがあるのは、このようにして得られるアルミニウム金属には、電気分解によって大量の電気エネルギーが化学エネルギーに変換されて蓄えられているためです。

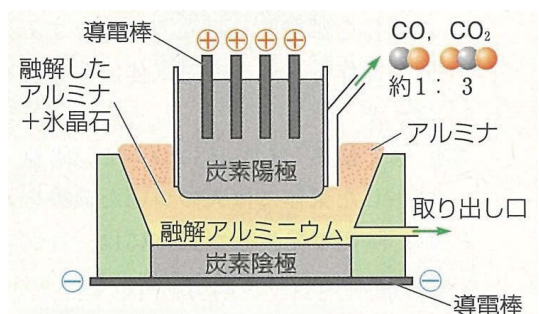


図3 アルミニウムの電解製錬

(電気メッキ)

金属を陰極上に析出させるという点では、上で述べた製錬・精錬と共通していますが、大切なポイントは薄い膜で均一に地金を覆うことで、地金の防食と装飾の役割を果たします。特に金メッキは、美しさに加え高い耐食性を持つため、錆びによる接触不良を防止するために電気回路の接点で使用されます。また、通常のメッキは製品を陰極にして、電解液中のカチオンを析出させますが、これとは逆に製品を陽極にして、その表面に酸化被膜を作るものもあります。アルミニウムの上に酸化被膜を施したアルマイト加工は特に有名で、この加工によって反応性の高いアルミニウムに実用的な耐食性を持たせることができます。また、やや特殊な例ですが、金属のチタンを陽極にしてその表面に酸化被膜を作る際、その厚さを調整することで、光の干渉作用を利用した着色が可能です。



図4 陽極酸化で着色されたチタン合金

写真提供：株式会社オーファ

簡単にできる銅の電解精錬のモデル実験

前回述べたダニエル電池などは、中学校や高等学校で生徒が実際に組み立てて実験することができますが、電解精錬は電気化学の特徴がしっかりと利用されているにも関わらず、生

徒が直接自分の目で確かめる機会がありません。そこで、次のような実験教材を開発しました。興味のある方は、ぜひ挑戦してみてください(『化学と教育』71巻400-403(2023))。

原理 粗銅をアノードにし純銅をカソードにして硫酸銅水溶液中で電気分解(電解精錬)を行うと、陽極中であって、銅よりもイオンになりにくい金属は、陽極(粗銅)の下に陽極泥として沈殿します。一方、銅よりもイオンになりやすい金属は、銅と一緒にイオンになります。銅のように陰極で金属として析出することなく、イオンのまま水溶液中に残ります。銀ろう(はんだの仲間)には、亜鉛、銅、すず、銀などが含まれているので、銀ろうを粗銅に見立て、電解によってこれから銅が金属として取り出されるようすを観察できます。

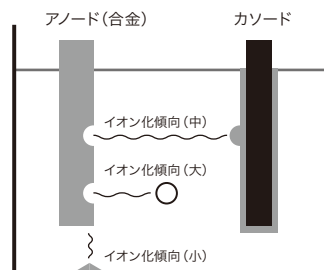


図5 電解精錬の原理

装置と方法 図6に示したように、小さなサンプル瓶の中に陽極(銀ろう)と陰極(シャープペンシルの芯)を入れ、約20mAで30分間通電します。

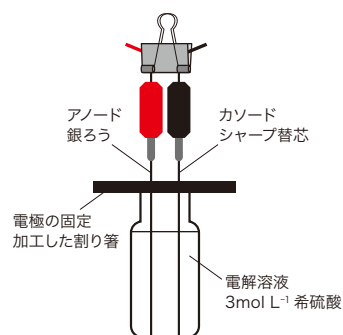
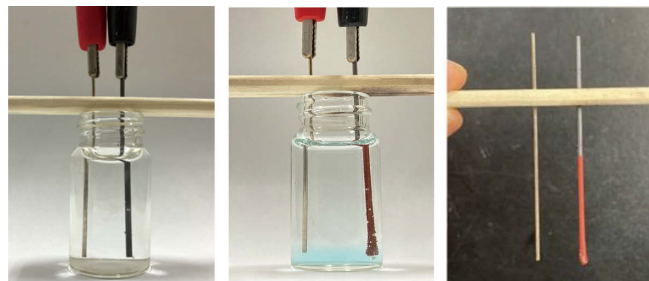


図6 実験装置

結果 通電前と通電後のようすは図7に示す通りです。銀ろうは銀色ですが、この銀ろうから赤茶色の銅金属が陰極上に取り出されたようすを確認できます。また、陽極泥は生じませんが、電解後の電解液に銀イオンが含まれていないことは、 Cl^- を含む水溶液を滴下し、白沈が生じないことで確認できます。また、Znについてはバックテストを利用して液中に存在することを確認できます。



電解前

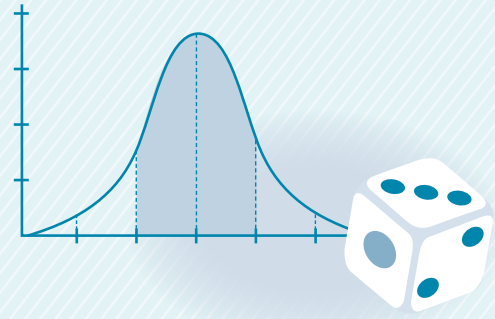
20mAで
30分間電解後

電解後の電極

図7 電解精錬のモデル実験

【第8回】

「ゲーム」の数学理論



東京大学 名誉教授

松原 望 / まつばらのぞむ

Ph.D. (スタンフォード大学)。1942年生まれ。東京大学教養学部基礎科学数学コース卒。統計数理研究所研究員、スタンフォード大学大学院博士課程、筑波大学社会工学系助教授、エール大学フルブライト研究員、東京大学教養学部・大学院総合文化研究科教授、同新領域創成科学研究科教授、上智大学外国語学部教授、聖学院大学大学院政治政策学研究科教授を歴任。著書には東大教養部統計学教室（編・著）『統計学入門』（東京大学出版会）、『わかりやすい統計学：データサイエンス基礎』（丸善）、『社会を読み解く数理トレーニング』（ペレ出版）、『計量社会科学』（東京大学出版会）、『意思決定の基礎』（朝倉書店）、『ゲームとしての社会戦略』（丸善）、『入門確率過程』（東京図書）、『入門ベイズ統計』（創元社）、『はじめよう！統計学超入門』（技術評論社）、『ベイズの誓いーベイズ統計学はAIの夢を見る』（聖学院大学出版会）など多数。

ジャンケン・ゲームからAIゲームへ

ポーカーのような心理的な戦略性（決定の確率、予測、駆け引きなど）のあるカードゲームは、社会、政治、経済・経営、精神医学などの要素を含んでいます。そこからエッセンスを数学的に分析し、初めて「ゲーム理論」を打ち立てたのは天才数学者フォン・ノイマン（1903-1957）です。「ゲーム理論」は社会の仕組みや動きを数学的に分析し理解するために欠かせません。AIなど強化学習でもゲーム理論が使われており、多くの場合「確率」も重要な役割を果たします。そのよい例は「ジャンケン」ゲームです。

ゼロ和ゲーム

ジャンケンは {石, 紙, はさみ} の3通りの「手」があります。プレイヤーをA（こちら）とB（相手）の2人とすると、結果は $3 \times 3 = 9$ 通りで、各プレイヤーに、勝ち、負け、引き分けの3通り $\{+1, -1, 0\}$ の利得が生じます。

A を x , B を y として、 $x + y = 0$ （ゼロ和）

ですから、引き分け

を除けば、結果は必

ず正負に分かれ、利

表1 ジャンケン（Aの利得）

		B		
		石	紙	はさみ
A	石	0	-1	1
	紙	1	0	-1
	はさみ	-1	1	0

害関係の明らかな基本的なゲームです（表1）。

ジャンケンは同時に出すので、A、Bは互いに相手の手の情報はなく不確実性があり、これは相手から見破られないメリットでもあります。実際、もしジャンケンに手番の前後があれば、もちろん「後手必勝」となります。

確率戦略（混合戦略）

ジャンケンは確率が大きな働きをするゲームです。相手の手は予測できませんので、こちらの手を1つに決めることができず、その確率を $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ としています。等確率は当然で、エントロピーも最大で、相手から見て最大の不確実性になりますから、全く見破られません。例えば $(\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{6})$ と「石」に偏り多く出すと見破られて、相手の「紙」で負けてしまう不利が出てきます。 $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ からは動きませんから、「均衡点」です。

Aの1つの手に対し、Bの3通りの手に応じて+1, 0, -1が $\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}$ の確率で決まるので、Aの利得の期待値は、

$$(\frac{1}{3}) \times (+1) + (\frac{1}{3}) \times (0) + (\frac{1}{3}) \times (-1) = 0$$

となり、ジャンケンは勝敗の点で確率論的に公平です。「手」を一通りでなく複数通りある確率で混ぜてとるやり方を「混合戦略」と言い、高度な知的戦略です。

頭の体操「ミニマクス原理」

ここからは「手」と言わず「戦略 (strategie strategy)」
 と言い、最適な戦略 (ゲームの解 solution of a game) を見
 いだすことを目的とします。まず表 2 を見てください。

プレイヤーは A, B
 の 2 人で、「二人ゲー
 ム」と言われます。こ
 こで約束ですが、A の
 利得を x とすると、B
 の利得は $-x$ なので、
 B は「 x だけ支払う」と読むことで $-x$ は表示しません。

表 2 2 人ゼロ和ゲーム (確定的)

		B		
		b_1	b_2	b_3
A	a_1	3	-2	0
	a_2	2	1	2
	a_3	2	0	-3

問 (最適戦略) プレーヤー A (こちら)、B (相手) はそれぞれ
 どの戦略をとるべきですか。結果として、A、B 間でどのよう
 な利得・損失の支払いが行われますか。

A の戦略 相手プレーヤー B のとる戦略がわからず、その確率
 もわからないなら、当方としては利得の最悪 (最も低利得)
 を想定してかかるのが合理的です。各戦略に表から、

$$a_1 : \min \{3, -2, 0\} = -2, a_2 : \min \{2, 1, 2\} = 1,$$

$$a_3 : \min \{2, 0, -3\} = -3$$

という評価を与えておけば、A の最良の戦略は、

$$\max \{-2, 1, -3\} = 1$$

から a_2 と決まります。最悪でも 1 の利得を確保できますが、
 a_1, a_3 では $-2, -3$ の可能性もあり不利です。もちろん、3, 2
 を期待することも相手次第であり不可です。 答: a_2

B の戦略 表は B の支払いを表します。ですが基本の考え方は
 同じで、支払いの最悪 (最大支払い) を想定し、

$$b_1 : \max \{3, 2, 2\} = 3, b_2 : \max \{-2, 1, 0\} = 1,$$

$$b_3 : \max \{0, 2, -3\} = 2$$

という評価を与えれば、B の最良の戦略は、

$$\min \{3, 1, 2\} = 1$$

から、 b_2 では最悪でも 1 の支払いで済みますが、 b_1, b_3 で
 はさらに大きい支払いの可能性があり。 答: b_2

A, B の間で 1 の利得・支払いで合致し、何の過不足も
 残らないから (a_2, b_2) がゲームの解です。■

ジャンケンとは異なり、戦略が一通りに確定的に定まり、か
 つここが重要ですが、結果の利得と支払いが互い一致しまし
 た。上に述べた A の考え方を MaxMin 原理 (マクスミン原理)、
 B の考え方を MinMax 原理 (ミニマクス原理)、 a_2 を

MaxMin 戦略、 b_2 を MinMax 戦略と言い、その利得と支払
 いの値はそれぞれ、MaxMin 値 = 1, MinMax 値 = 1 と表せ
 ます。ここでは、MaxMin 値 = MinMax 値となりました。

問 表 3 の 2 人ゼロ和ゲームは、戦略がそれぞれ x, y で、利得
 表は $y^2 - x^2 + 4$ です。MaxMin 戦略、MaxMin 値および
 MinMax 戦略、MinMax 値を求めなさい (答は 6 節)。

なお、MaxMin 原理も MinMax 原理も呼び名の違いだけ
 ですが、後者の言い

方が多いようです。

また、今後は用語

「最良 best」の代わ

りに「最適 optimal」

を用います。

表 3 2 人ゼロ和ゲーム (確定的)

x \ y	y	B							Min
		-3	-2	-1	0	1	2	3	
A	-3	4	-1	-4	-5	-4	-1	4	-5
	-2	9	4	1	0	1	4	9	0
	-1	12	7	4	3	4	7	12	3
	0	13	8	5	4	5	8	13	4
	1	12	7	4	3	4	7	12	3
	2	9	4	1	0	1	4	9	0
	3	4	-1	-4	-5	-4	-1	4	-5
	Max	13	8	5	4	5	8	13	

ゲーム理論の基本定理: ミニマクス定理の威力

支払いと受け取りが一致するのはあたりまえのようですが、
 最適となると決してそうではありません。

問 次の 2 人ゼロ和ゲー

表 4 2 人ゼロ和ゲーム (確率的)

ムの MaxMin 戦略、

MaxMin 値, MinMax

戦略, MinMax 値を求

めなさい。

		B	
		b_1	b_2
A	a_1	8	0
	a_2	6	9

答 MaxMin 戦略 a_2 , MaxMin 値 = 6

MinMax 戦略 b_1 , MinMax 値 = 8 ■

今回は MaxMin 値 < MinMax 値となり、両者の値が異な
 ります。相手が 8 だけは支払う用意があるなら、こちらは 6
 で我慢する理由はなさそうですし、こちらが 6 で満足してい
 るなら、相手は 8 は払い過ぎと感じるでしょう。「最適」なの
 に不思議な結果で、ジャンケンでも似たようすになります。

問 「ジャンケン」ゲームに対し、MaxMin 値, MinMax 値を求
 めなさい。

答 MaxMin 値 = -1, MinMax 値 = 1 ■

このような不一致の場合、例えそれぞれ単独の最適戦略が
 あっても、ゲームの解を数学的に完全に決定することはできま
 せん。実は、MaxMin 値 < MinMax 値の場合でも、数学的
 に新しい最適戦略を講じて両者を等しくすることができます。
 それは、戦略を一通りでなく複数まで許し、その上に確率を
 与えることです。ジャンケンなら $\frac{1}{3}$ ずつですが、期待値は双

方とも 0 となって、確かに $\text{MaxMin 値} = \text{MinMax 値}$ です。

「確率」が**数学的**に最後の救済法になるのです。

ゲーム理論の基本定理 (フォン・ノイマン, 1953)

2人ゼロ和ゲームにおいて

- 1 絶対不等式 $\text{MaxMin 値} \leq \text{MinMax 値}$ が成り立つ。
- 2。(確定的) $\text{MaxMin 値} = \text{MinMax 値}$ ならば、
最適戦略のペアがゲームの解を与える。
- 2。(確率的) $\text{MaxMin 値} < \text{MinMax 値}$ ならば、戦略の
集合に適切な確率を与え、それぞれの**混合戦略**の利得
の期待値を考えることにより、 $\text{MaxMin 値} = \text{MinMax 値}$
とすることができ、 MaxMin 混合戦略 、 MinMax 混合
 戦略 のペアが解を与える。

問 表4の2人ゼロ和ゲームに対して、 MaxMin 値 、 MinMax 値 、さらに各プレイヤーの最適混合戦略、それらの MaxMin 値 、 MinMax 値 を求めなさい。

答 定理の2.から、 a_1 、 a_2 の確率を p 、 $1-p$ および b_1 、 b_2 の確率を q 、 $1-q$ として、混合戦略のペア $(p, 1-p)$ 対 $(q, 1-q)$ が最適となる。まず p を求める。表からAの利得の期待値は相手が b_1 なら $8p+6(1-p)$ 、 b_2 なら $9(1-p)$ である。 MaxMin 原理から、まずその小さい方の (p) の関数 $\text{Min}\{8p+6(1-p), 9(1-p)\}$ で考え、さらにその中で Max を与える p が解になる。この関数は $p = \frac{3}{11}$ で場合が分かれ、 $p = \frac{3}{11}$ で最大値 $\frac{72}{11}$ を与える山形に折れた一次関数の組み合わせである(図略)。従って最適混合戦略は $(\frac{3}{11}, \frac{8}{11})$ 、 $\text{MaxMin 値} = \frac{72}{11}$ 。B は支払いで考え、 Max と Min が入れ替わる以外は方針は同じで、表から q の関数 $\text{Max}\{8q, 6q+9(1-q)\}$ の Min を与える(関数は折れた谷形)。 $q = \frac{9}{11}$ で $\text{Min} = \frac{72}{11}$ 。よって、最適混合戦略は $(\frac{9}{11}, \frac{2}{11})$ 、 $\text{MinMax 値} = \frac{72}{11}$ 。■

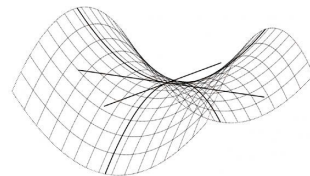
このように、混合戦略によって $\text{MaxMin 値} = \text{MinMax 値} = \frac{72}{11} = 6.54$ が成り立ち、この額が両者間で支払われることでゲームは完全に解かれました。元の差 2 は、6 から 0.54 だけ利得が増加、8 から 1.46 だけの支払い減少となって 3:8 に理論的に公平に分配されています。

数学的に見れば「鞍点」

表3のゲームでは、 x についてはこの利得の最大、 y についてはこの支払いの最小を目的にし、 MaxMin 戦略 は $x = 0$ 、 MinMax 戦略 は $y = 0$ 、 $\text{MaxMin 値} = \text{MinMax 値} = 4$ で、

これが解です。

利得の 3D グラフで見ると、確かに $(0, 0)$ で最大(x 方向)と最小(y



方向)が同時に成り立つことがわかります(奥行きが x 軸、左右が y 軸、作図の都合で高さ $z = 4$)。

図1 表3のゲームの鞍点

(最大かつ最小) 作成: 小船幹生氏

幾何学的に見ると、 $(0, 0)$ は馬の鞍の位置に対応し「鞍点」^{鞍点} saddle point と言われます(図1)。ここから少しでも外れると、最大からは減り最小からは増えてしまうので、一度鞍点の実現すれば、そこから動くことはありません。その意味で「均衡点」、経済学では「ナッシュ均衡点^{*1}」と言います。これがゲームの解の背景です。

*1 J.Nash (1928-2015) : ノーベル経済学賞受賞

AIのゲームにおける意義

チェス、囲碁、将棋などのゲームではこれまでプロ対AIの対戦の歴史があり、チェスでは Deep Blue が勝ち(1997年)、囲碁では Deep Mind の「アルファ碁」が勝っています(2016年)。将棋では Bonanza がプロ相手に善戦し(2007年)、その後もAIがプロ相手に勝つ事例が展開しています。元々解がないならコンピュータを駆使しても空しい徒労に終わりますが、将棋では一コンピュータ将棋は2人**完全情報**^{*2} 確定的ゼロ和ゲームであることがわかっています。

*2 各時点までの(手の)経過が知られていること

筆者は、だからAIとのゲームで、(極端に大きい数の戦略の中から)ゲームの解があるとまで言っているのかどうかについては詳しくありませんが、重要な指摘であり、今後深める価値のある課題です。

まとめ 数学的に定義されたいくつかの基本的ゲームについては、数学的解の存在とその性質が明らかにされ(ミニマクス定理)、その意義と解釈も明らかにされている。この結果はAIによるゲームの開発を考える上でも有用である。

第9回予定 マルコフ連鎖シミュレーション



参考文献

- 松原望『意思決定の基礎』朝倉書店
- 瀧澤武信(他)『人間に勝つコンピュータ将棋の作り方』技術評論社

【第8回】

放射線 (radiation)

アルファ粒子, ベータ粒子, ガンマ線
(α -particle β -particle γ -ray)

科学的知識が発展するにつれて、言語も発展する。新語が導入され、古い語は以前よりも広い分野に、または通常の言葉とは別の意味で使われる。

ハイゼンベルク (1901～1976)
『現代物理学の思想』(1958)第10章
『現代物理学における言語とリアリティ』より



元徳島県公立高等学校 教諭

西條 敏美 / さいじょう としみ

1950年徳島県生まれ。関西大学工学部および同大学院修士課程で気体電子工学専攻。卒業後35年間、徳島県の公立高校で理科(物理)教員として勤務し、2011年定年退職。1982年に徳島科学史研究会を創設。理科教育の立場から科学史の活用に関心を持つ。科学史を取り入れた高校教科書『理科基礎』(実教出版)の共同執筆にもかかわった。おもな著書に、『理科教育と科学史』(大学教育出版),『測り方の科学史(I)(II)』,『単位の成り立ち』(以上恒星社厚生閣),『物理定数とは何か』(講談社ブルーバックス)など。趣味は毎日1万歩、1時間15分歩くこと。現在地球の全周の100分の96を達成。

1896年フランスのベクレルは、ウラン鉱石が不思議な放射線を発することを発見しました。前年のレントゲンによるX線の発見、翌年のJ.J.トムソンによる電子の発見とともに、新分野の一つを切り拓くきっかけとなりました。新分野を開拓するということは新語を決めることと常に一体化しています。今では当たり前となっている新語が多数生まれました。

今回は、放射線、特に3種の放射線の用語に関して、ベクレル、同国のキュリー夫妻、イギリスのラザフォードの3人がどんな語を発案したのか、見てみます。

ベクレル線とウラン放射線

ベクレルの祖父も父も物理学者で、父は蛍光や燐光の研究をしていました。光(紫外線)の照射を受けた物質が、受けたときだけ柔らかい色に輝く現象を蛍光、しばらく後まで発光が続く現象を燐光として区別していました。ベクレルは父の研究の後を継ぎました。

1896年2月、彼は写真乾板を黒い紙で包み、その上に蛍光物質(ウラン塩の一種)を置いたものを、日光にさらしました。太陽光の働きで蛍光物質が蛍光を放ち、その蛍光のなかにX線が含まれているとすれば、X線は黒い紙を透過するはずでした。このことを試みたのは、前年12月に発見されたX

線は、陰極線で叩かれたクルックス管のガラス面から出ている、ガラス面は蛍光を発していることに関してポアンカレが、「蛍光とX線とは結びついている。蛍光の原因がどうであれ、十分強い蛍光を発する物体は、X線を放出するのではないかと指摘していたことも影響したようです。

乾板を現像すると、果たして感光していました。その後数日間、曇りの日が続いたので、実験を中断しました。しかし乾板を現像してみると、驚いたことに先よりも強く感光していたのです。太陽光に関係なく蛍光にも関係なかったのです。このことを詳しく追試し、同年44歳のとき「燐光によって発せられる放射について」「燐光体によって発せられる不可視放射について」「金属ウランからの新放射の放出」と題して、一連の論文をフランスの学会誌にフランス語で発表しました。いずれも短報で、図表はなく実験の内容が簡潔にまとめられています。

これらの論文で、この放射線は塩のなかに含まれるウラン元素によるものであることを結論づけたのです。ちなみにウラン元素は18世紀には発見されていました。

彼が用いた語はradiation(放射)でした。ほか「不可視放射」「新放射」のように表記しているだけで、新語を命名していません。レントゲンの「X線」を意識して、「Y線」とでも命名すれば面白かったかもしれません。

しかし、表記し議論するにも何か適当な名前が必要です。

ただちに科学者の間で、発見者の名をとってベクレル線 (Becquerel radiation)、物質の名をとってウランウム線 (uranium radiation) などと呼ばれるようになりました。

ポロニウム、ラジウム、放射能

ベクレルの放射線の発見はレントゲンのX線に比べると地味でしたが、マリー・キュリーらに引き継がれました。彼女は気の遠くなるような実験を精力的に行い、1898年には立て続けに論文を、単独であるいは夫ピエールとの連名で発表しています。

最初の論文では単独で同様な放射線がトリウム元素からも出ていることの発見を伝えています。次の2つの共著論文では、ウランやトリウムよりもはるかに強い放射線を出す2つの元素の発見を伝えています。この元素に名前を付ける必要があります。彼女らは、放射線の強さがウランの400倍の元素にポロニウム (Polonium)、10万倍の元素にラジウム (Radium) と命名しました。前者に関して「もし、この新しい金属の存在が確かめられた場合には、私たちは、2人のうちの1人の出生国の名を取って、それをポロニウムと名づけたい」、後者に関して「私たちはその新しい元素にラジウムという名前を与えることを提案する」などと各論文で述べています。

マリーは同年の論文で、radioactivity (放射能) という新語を初めて使いました。この語は radio と activity の合成語で、radio は、ラテン語の radius に由来し、半径などのほか放射という意味も持ちます。元素のラジウムの名もここから来ています。activity は活動とか能力といった意味を持つ日常語です。当時としては新鮮な語でこれもただちに受け入れられました。1900年の総合報告では、「ベクレル線を放出する物質を radioactive substance (放射性物質) と名づける」と述べています。この語も彼女が最初に使ったとされます。

α 線、 β 線、 γ 線

キュリー夫妻の研究を引き継いで、放射能研究に大きな足跡を残したのがラザフォードです。彼は紆余曲折、試行錯誤しながら、今日の基礎を築き上げました。言い換えると、今日では当たり前になっている新語を提起して定着させました。

その最たる語は放射線を区別する α 線、 β 線、 γ 線の3語

です。1898年までに放射線には少なくとも2種あるらしいことはわかっていました。キュリー夫妻も気付いてはいました。ラザフォードは1899年の論文で、ウランウム放射線の透過力を測定した実験結果について、0.02mmのアルミ箔で止められたが、2mmの厚さでやっと止まったといい、こう提案しています。

「これらの実験は、ウランウム放射線 (uranium radiation) が複合であること、すなわち、少なくとも2種類のはっきり違った放射線であることを示す。一種類は非常に吸収され易いもので、これを便宜上 α 線 (α radiation) と呼び、より透過性の強い一種類を β 線 (β radiation) と呼ぶことにする。」

この頃は、ギリシャ文字がまだ物理にあまり使われていなかったもので、自由にどの文字でも使えました。透過力の小さいほうを α 、大きいほうを β で区別したのです。何だか不自然なので吸収力で言い換えると、これが大きいほうが α 線、小さいほうが β 線ということになります。この透過力 (吸収力) だけで区別するのであれば、X線と同じように、soft-radiation (軟放射線)、hard-radiation (硬放射線) でよかったかもしれませんが、結果から見ればその本性が違うので、 α 、 β の区別でよかったと言えます。

とはいうものの、その本性を探るために電場・磁場で屈曲するかどうかの実験も行われていました。1899年ベクレルはウランからの放射線の一部 (β 線相当) が磁場によって屈曲し、その向きから陰極線粒子 (電子) と同じ向きであること、また比電荷測定から電子の値と近いことも見出ししていました。

ところが1902年春頃には、 α 線、 β 線の意味が変容し、透過力の小大ではなく、磁場で屈曲しないのが α 線、屈曲するのが β 線と捉えられていました。

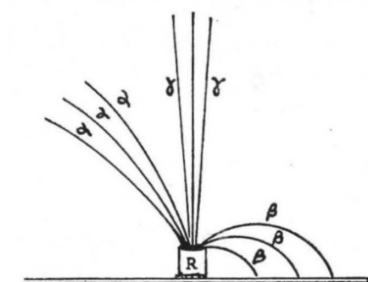
一方、先立つ1900年には、透過力が β 線よりはるかに強いものがあることがフランスのヴィラールによって発見されていました。彼はウラン放射線を研究中にこのことに気が付き、その現象通りに「透過力のきわめて強い線」と呼ぶだけで、根本的に異なる種類の放射線として捉えることなく、命名もしなかったのです。これに γ 線という語を初めて用い、位置づけたのは、これまたラザフォードでした。3年後の1903年の論文の冒頭で、彼はラジウム放射線には3つの型があるとして、 α 線、 β 線、 γ 線を書き並べています。

(1) α 線は、物質の薄い層で非常に簡単に吸収され、通常

の実験条件下で観察される気体の電離の大部分を引き起こす。

(2) β 線は、高速で放出した負に帯電した粒子から成り、真空管内で生成される陰極線とあらゆる点で類似している。

(3) γ 線は、磁場によって屈曲せず、非常に透過性のある性質を持つ。



磁場での屈曲の違いを示す最初の図
ラザフォードの論文(1904)から

1899年の論文では α radiationでしたが、1903年の論文では α -raysのように、radiationがraysのように変わってきています。1904年の論文では、初等教科書にも掲載される磁場での屈曲を示す馴染み深い図が掲載されています。

α粒子 β粒子

命名された α 線、 β 線、 γ 線の本性は何なのか、粒子か波動か、その解明には多くの歳月を要しました。最初に解明されたのは β 線で、上で述べたベクレルのほかカウフマンらはラジウムから放射線を用いて詳細な実験を行い、負に帯電した高速の粒子(電子)であることを明らかにしました。 γ 線の本性が解明されたのは10年後の1914年のことで、ラザフォードとその弟子アンドレードとの共同研究によるものでした。

この間、ラザフォードは α 線の本性解明にもっとも精力をつぎ込みました。 α 線が当初、電場・磁場で屈曲せずに、 β 線放射の2次作用による波動(2次レントゲン線)であるという考えもありました。今から思うと α 線が屈曲しなかったのは、 α 線も帯電粒子でしたが、 β 線に比べて遥かに重い高速の粒子であったからです。ラザフォードは、1902年帯電粒子であるに違いないと思い巡らしていました。そこで、強力な磁石を調達し、放射線源もより純度の高いラジウム塩を入手し、巧妙に設計された装置で実験を行い、屈曲に成功しました。その向きから α 線は正に帯電した粒子であることを示し、その比電荷の測定にも成功しました。その電荷や質量も決定し、ヘリウム原子であるとほぼ結論づけました。1910年代初めには発光スペクトルまで分析して、このことを確実なものとししました。

α 線と β 線の粒子性に注目して、 α -particle(α 粒子)、

β -particle(β 粒子)という語も自ずと使われ出しました。

言葉の大海原へ

3種の放射線の本性が明らかにされても、探究が終わったわけではありません。本性研究と相まって放射線が出てくる機構についても研究が押し進められました。ここでもその中心になったのはラザフォードとソディらでした。まだ原子構造、ましてや原子核の存在も知られていない時代でした。

しかし、原子は放射線を出して他の原子に変わっていくことが認識されていきました。この過程において、多くの物質用語や事象を表す新語が作られたり、日常語が導入されたりしました。例えばemanation(エマネーション)はラザフォードが1900年の論文で初めて使い始めた語で、放射性元素が α 崩壊してできたガス状の物質をさす語でした。親原子名を頭につけて、ラジウムエマネーション、トリウムエマネーションなどと呼ばれました。emanationという語は「発散物」の意味があり、17世紀に使用例がありますが、科学用語としてはラザフォードが最初に使ったのでした。この語はラドンの名に切り替わり、現在はあまり用いられていません。同じくラジウムX、トリウムXなどと、未知を表す「X」も使われました。そもそも、原子が放射線を出して他の原子に変わっていくこと、これにはdecay(崩壊、壊変)という語が用いられ、half-life(半減期)という大事な概念を表す語も生まれました。この語も最初に使ったのはラザフォードでした。放射線壊変は3種の系列の語で集約され、途中の元素についても多くの名称が与えられました。その過程で、アイソトープ(同位体 isotope)という重要な新語も生まれました。この語はequalとplaceを意味するギリシャ語を組み合わせた造語で、同じ位置にあることを意味します。この新語は1913年ラザフォードの共同研究者ソディによって命名されました。

まさに言葉の大海原が開き出てきたと言えるでしょう。



文献案内

- 物理学史研究刊行会編『物理学古典論文叢書』第7巻(東海大学出版会)。
- The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson, Vol. I, George Allen and Unwin Ltd.
- マダム・ピエール・キュリー著、皆川理ほか訳『放射能』上・下(白水社)
- T.J.トレン著、島原健三訳『自壊する原子 ラザフォードとソディの共同研究史』(三共出版)

教育政策の大局的なビジョンと数学を楽しむ心 — 回想の静海先生 —

筑波大学人間系 教授・教育学域長

清水 美憲 / しみず よしのり

公益社団法人日本数学教育学会代表理事, 新算数教育研究会会長,
日本学術会議・連携会員, 日本学術振興会学術システム研究センター・
専門研究員



▶ 1 はじめに

清水静海先生には、筑波大学で直接の上司として長らくご指導をいただく一方で、着任以前から日本数学教育学会や新算数教育研究会、文部科学省の全国学力・学習状況調査の専門家会議、そして教育課程実施状況調査の問題作成委員会や分析委員会など、数え切れないほど多くの機会でご一緒させていただき、多くのことを教えていただいた。

改めて静海先生のご指導に感謝申し上げながら、特に新算数教育研究会（以下、「新算研」）をめぐる先生のごようすを少し振り返り、僣越ながら関係の皆様とともに静海先生を偲びたいと思う。

新算研は、1971年に発足した全国規模の研究団体で、日本の算数教育を先導的に追究し、授業提案や教材開発を中心に、我が国の実践研究を牽引してきた。発足以来50余年を数えるこの研究会は、文部科学省の教育政策を踏まえ、よりよい授業やカリキュラムのあり方を、実践を通して研究することを目的としている。静海先生は、新算研の第7代会長として、4期8年間の長きにわたり、常に高い展望に立って、研究会の進む方向を示しつつ牽引された。

▶ 2 年末のセミナーで

新算研は、『新しい算数研究』という機関誌の刊行のほか、年末の開催が恒例のセミナーと、開催地を変えながら実施する全国大会を主たる活動の2つの柱としている。このうち

セミナーは、宿泊を伴う形で長らく箱根を中心に開催していたが、数年前から湯河原に会場を移している。

毎年250名から300名の参加者のあるセミナーで、静海先生は会長としての役割はもちろん、シンポジウムや全体講演など、毎回イベントの中核で全体を牽引された。特に、学習指導要領の改訂を迎える時期や新しい学習指導要領が告知された直後などは、各時代の教育政策の中心的なビジョンをわかりやすい言葉で説明いただくのが常であった。静海先生は、シンポジウムや全体講演で、「急所」という言葉をよく使われた。教育改革のエッセンスや中心的なアイデアの「急所」を端的に示されるため、その時々改訂の真意を知って我々参加者は目を見開かされた。

年末に温泉で開催されるこのセミナーの特徴は、2日間のプログラムに加え、夜を徹して語り合う機会にもある。昼間のプログラムでは、教材や授業についての提案と討議が熱心に進むが、夜になってアルコールが入ると参加者はさらに熱く語り合う。静海先生は、全国各地に知り合いが多数おられ、この夜の会では、懇親会の後の2次会会場、そしてさらにその「先」へと部屋を渡り歩かれ、普段近くでお話ができず静海先生と語りたい参加者と夜遅くまで（ときに朝早くまで）語り合われるのが常であった。

セミナーのさまざまな場面で参加者が静海先生に惹きつけられるのは、教科を超えた広い文脈で教育政策の動向を大局的な観点から語られ、新しい展望を切り拓いて下さることだったと思う。また、セミナーだからこそ静海先生と近くでお話ができることを楽しみに先生に会いに来られる参加者も多

く、先生もそれに応えておられた。

▶ 3 小学校の教室で子供たちと数学を楽しむ

新算研の全国大会には、大学教員や小学校長が特別に授業を行う「特別公開授業」というプログラムがある。全国大会は、600名程度から1,000名を超えるまでの規模で全国の教師が集まる研究会なので、「眼の肥えた」多数の教師の前で授業を行うことになる。静海先生は、この全国大会で頻繁に授業者を務められた。静海先生の指導者であられた和田義信先生もよく信州を訪れて授業をしておられたと伺ったことがあったが、先生は教室で子供たちと算数を楽しむことをとても大事にしておられた。

例えば、平成6（1994）年10月29日に東京都で開催された第10回全国大会（武蔵野市立第三小学校）では、5年生のクラスで、「ものの個数のちがいの調べ方」についての授業をされた。当日は、10時スタートの授業のギリギリに教室に到着され、参加者はハラハラしていたが、授業者の静海先生は、三角形が6段に並ぶ図をめぐって、児童をいろいろに「泳がせて」楽しく授業をしておられた。「あなた、どうしてそんなにいいこと思いついたの？」と優しく問いかける独特の「発問」が懐かしく思い出される。

一方、平成17（2005）年11月3日に茨城県で開催された第21回全国大会（水戸市立仙波小学校）では、6年生のクラスで、五角形に対角線を引いてできる辺や角の大きさを題材に、「図形の秘密を探る」の授業をされた。五角形とその対角線には、数学的に興味深い特徴がさまざまみられるが、この授業でも静海先生は、問題にチャレンジして考えていく児童の姿を楽しんでおられるようにお見受けした。このような授業の指導案は、先生ご自身が「数学すること」を楽しむ教材研究によるものであった。

令和元年（2019）年の第35回全国大会の開催地は、長野県松本市の開智小学校だった。先生が新算研会長として、全国から力のある算数関係者を率いて故郷に凱旋された観のある大会であった。折しも、この年は、旧開智学校が国宝に指定された年で、校長室で高校時代の同級生であった教育長先生と話されるごようすは、ことの外、楽しそうにお見受けした。この大会でも先生は、「正五角形を切って並べかえ四

角形をつくる」という公開授業をされた。この授業の指導案は、数学色の強い教材研究がメインで、ここでも、先生の数学する心が色濃く現れていた。

▶ 4 本質を見極めつつ光と影の両方を視野に

静海先生には、ものの見方について、「本質を見極めること」「光と影の両面に目を向ける」ということの大切さを教えていただいていた気がする。先生が常日頃からこのようなものの見方をしておられたごようすを、過去の機関誌から窺い知ることができる。

平成15（2003）年の機関誌『新しい算数研究』で、静海先生は、「どこか変だよ！ 最近の算数の授業」という刺激的な表題での巻頭言を執筆しておられる（『新しい算数研究』No.384, p.1, 2003年）。当時は、「ゆとりの中で生きる力をはぐくむ」という立場から教育課程の新しい規程が示され、いわば規制緩和ともいえる発展的な学習内容の許容や、教員定数の加配による環境整備が進行していた。

静海先生は、この動きを算数教育の展開にとって重要な転換と位置付けた上で、『『少人数指導』では学習集団を小さくするだけで成果が上がるのか？』『『発展的な取り扱い』は特定の子供たちに教科書にないことをすることでよいのか？』のような4つの疑問を呈しておられる。

例えば、少人数指導について、へき地小規模校の授業改善の課題が実は「少人数」ゆえによるもので、多様な考えを工夫したり出し合ったりして切磋琢磨することが困難であるといったようなことにあったと「少人数」の影にも触れておられる。そして、「少人数」の光と影の両方を検討して、「光」を活かすことに勢力を投入せよとしておられる。

このような発想は当方には思いもつかないもので、改めて先生のビジョンの広さが窺える。

たまたま信州の同郷で、姓が同じ清水であったこともあり、静海先生にはいつも気にかけていただき、インフォーマルな場で先生を「兄貴」と呼ぶ当方の無礼をお許しいただいていた。改めて静海先生に感謝申し上げて、拙稿を閉じたいと思う。



静海先生に教えられた二つのこと

文教大学教育学部 教授

永田 潤一郎 / ながた じゅんいちろう

1962年東京生まれ。千葉県内の高等学校と中学校に17年間勤務した後、2005年から文部科学省で教科調査官を務め、平成20年の学習指導要領改訂に携わった。またこの期間、国立教育政策研究所で教育課程調査官・学力調査官を兼務し、全国学力・学習状況調査の立ち上げと問題作成及び分析等を担当した。2012年より文教大学教育学部に勤務。



▶ 1 静海先生との出会い

清水静海先生（以下、ご本人とお話する際に使わせていただいていた「静海先生」で記す）のことは、以前から著作や講演等を通じて存じ上げていたが、直接の関わりを持たせていただくようになったのは、私が教科調査官として平成20年の学習指導要領改訂で中学校数学を担当するようになってからである。学校現場から国の教育行政の仕事に飛び込んだ新参者の私に対して、当時主任視学官を務めておられた根本博先生（茨城大学名誉教授）から「改訂の舵取り役である主査は、静海先生にお願いしてみてもどうか」とのアドバイスを受けたのがきっかけであった。当時の私の認識として、静海先生は算数教育の大家であり、中学校数学の学習指導要領改訂の仕事を引き受けてくださるかどうか案じていた。しかし、ご相談に伺ったところ、その場でご快諾をいただけて安堵したことを今でもよく覚えている。その後一緒に仕事をさせていただく中で静海先生から教えていただいたことは数多い。以下では、そんな中から今も私が大切にしていることを二つ書き記しておきたい。

▶ 2 平静さを保つ

学習指導要領の改訂とは、一言でいえば教科教育の専門家と文部科学省の事務方との教育課程編成を巡っての闘ぎ合いである。中学校数学科の立場から改訂に力を貸してくれる協力者の先生方の意見がそのまま通るとは限らない。そんなとき、過去の改訂では、その誠実な思いに起因した苛立ちを露

わにする協力者もいたという話を諸先輩方から聞いていた。協力者と文科省事務方との間におかれる教科調査官にとっては苦境に立たされる場面であり、平成20年の改訂でもそうした機会がいくつもあった。私が驚いたのは、そうした場面で静海先生が腹を立てる姿を一度も見せなかったことである。

一例を挙げよう。これは学習指導要領の改訂が一段落し、学習指導要領解説の編集に取りかかっていたときのことである。事務方から「中学校数学の学習指導要領解説の内容構成を変更して欲しい」との要望が唐突に出てきた。学習指導要領では、学年ごとに各領域の内容が示されていることは周知の通りである。これに対して平成10年改訂の学習指導要領解説までは、領域ごとに各学年の内容が示されていた。つまり、内容の構成が学習指導要領とは異なっていたのである。今ではこのこと自体を知る人も少ないのかもしれないが、それまで長く中学校で数学を指導していた私にとって、この構成の違いは大変意味のあることだった。系統性が大切な算数・数学科の学習指導要領ではスパイラルな教育課程が編成されている。このことを学校現場の先生方に伝え、実践に活かしてもらうためには、領域を柱として3学年の内容を解説する方がよいと考えていたからである。事務方はこれを学習指導要領と同じ構成に変更して欲しいという。理由は簡単で、「他教科は中学校数学のような構成になっていない」という横並びの原理である。私は協力者の了解も得て「変更したくない」ことを事務方に何度も説明したが埒が明かない。最終的には事務方の意向を吞まされることになった。このことを協力者に伝えたときのことが忘れられない。不服そうな多くの顔が不甲斐ない調査官に向けられていたのである。そんな

中で静海先生は一言「仕方ない。貸しをつくっておけ」とだけおっしゃった。紙数の関係で割愛するが、この「貸し」が後々大変役に立ったことも私にはよい勉強になった。

学習指導要領の改訂と解説の編集が全て終了した後、静海先生とご一緒した酒宴の席でのことである。「静海先生も納得のいかないことは多かったはずなのに、一度もそうした姿を見せなかったのはなぜか」とお訊きした。これに対して静海先生は「私が怒り出したら、いい学習指導要領ができたと思うか」とだけおっしゃった。学習指導要領やその解説は学校教育の理想をまとめた文書ではない。その時々を生きる人々の学校教育に対する思いの妥協の産物である。平静さを忘れずに、その妥協点をよりよいところに導くことが教科調査官の仕事であることを静海先生に教えていただいた。

▶ 3 ^ひ 退き方を見通す

静海先生からは、無理押しするより^ひ退き方を考えながら仕事をする事の大切さも教えていただいた。2でも書いたとおり、学習指導要領改訂の過程では協力者の先生方の意向が文科省事務方の考えと合わない場合がある。そんなとき、教科調査官としては協力者の先生方の意向を活かすためにどうしても無理押ししたくなる。そうした私の思いが伝わったのだろう、静海先生から『だめだ』と言われたらどうする、「そのときの退き方をしっかり決めておけ」と釘を刺された。つまり、プランBはもちろん、プランCも見通して次善の策を決めておき、事務方との交渉でどこまで退いてよいのか、そのラインをはっきりさせておけということである。一例を挙げよう。平成20年改訂の学習指導要領では、数学的活動の扱いが重要なテーマの一つであった。従来の学習指導要領では教科の目標にしか記されていない数学的活動を一層充実させるためにはどうすればよいのか。その記述の仕方と記載する位置が重要な論点になったのである。協力者との協議の結果、記載する位置については次の3案を作成した。

- ・第1案：「第2 各学年の目標及び内容」の「2 内容」に、
四つの領域と横並びで記載する
- ・第2案：「第2 各学年の目標及び内容」の「3 内容の取扱い」に記載する
- ・第3案：「第3 指導計画の作成と内容の取扱い」に記載

する

当初、協力者の総意は第1案で、このケースしかつづけていなかった。学校現場の全ての先生方が数学的活動に取り組んでくれるためにはこの位置に記載してメッセージを送ることが必要だとの判断である。しかし、協議の過程でも、それは事務方が了承しないのではないかという懸念が根強く残った。四つの領域の内容と比較すると明らかに質的に異なる記述になることがわかっていたからである。第1案で一点突破を目指すべきかどうか。悩む私に静海先生は退き方を考えるための別案の検討を指示された。その結果生まれたのが第2案と第3案である。これを受けて、私がそれぞれの案に対応した記述の仕方の案を複数作成して協力者の先生方に検討してもらった。膨大な情報との格闘になったが、その結果、事務方との交渉の筋道が決まった。やはり第1案を最優先で推すが、第1案が通らない場合は第2案まで退くことを止む無しとする。ただし、第3案まで撤退することは極力回避したい。第3案の「第3 指導計画の作成と内容の取扱い」に記載しても、学校現場の多くの教師がそれを熟読し、実践してくれるかどうかについては疑問が残るというのがその理由である。こうした綿密な準備のもと事務方との交渉に臨んだ。結果はご存じの通り、第1案が了承された。結局、第2案と第3案は活かされず我々の希望通りになったわけだが、私にはそれ以外にも収穫があった。異なる考えを持つ人たちとの交渉では、たとえ正論だと思っても前進だけでなく後退も受け入れて結論を導くための工夫をすることの大切さを学ぶ機会を得ることができた。こうした交渉術を教えてくれたのも静海先生である。

▶ 4 私にとっての静海先生

静海先生はその^{ごうほうらいらく}豪放磊落なイメージから、仕事も^{ごうたん}豪胆に突き進めていくと思う人もいるようだが、私の印象は全く異なる。ここまで紹介したことからもわかるように、むしろブレーキのかけ方が上手で、抑制的な仕事ぶりに教えられることが多かった。昨今、自己主張と勢いばかりの数学教育関係者が増えていると感じる私にとって、静海先生が泉下の客とられるのはまだまだ早過ぎたと、今以て思えてならないのである。



「令和の日本型学校教育」を担う新たな教師の学びの姿について —今こそ、大学、教育委員会、学校の三者連携・協働の取り組みの充実を—

佐藤 浩 / さとう ひろし

日本体育大学教授。東京都立中学校保健体育科教諭、江戸川区教育委員会指導主事・統括指導主事、東京都教職員研修センター・東京都教育庁指導部統括指導主事、杉並区教育委員会教育人事企画課長、江戸川区立二之江中学校長、東京都教育庁指導部主任指導主事（人権教育担当）、東京都教育庁指導部体育健康教育担当課長、新宿区立新宿西戸山中学校長を経て現職。現在、Rimse 東京懇談会委員。



1▷ はじめに

Rimse 東京懇談会においては、令和4年度以降「令和の日本型学校教育の実現に向けて」をテーマに掲げ、教員の養成・研修、学習指導要領が示す教育の実現等のキーワードをサブテーマに、さまざまな観点から協議を重ねています。第13・14回懇談会では「教員の養成・研修」について、各委員が事前に調査した教育現場の実態を元に、校内研修における管理職の役割、教科別研究会への期待・必要性等について、小・中学校、教育委員会、大学のそれぞれの立場から捉えた課題とともに、今後の方向性について協議しました。

私は大学卒業以降、公立中学校教員、教育行政職員、そして、教育行政及び学校管理職として教員の育成、研修、採用・任用に携わり、現在は大学教員として養成に携わっています。こうした経験を踏まえ改めて教員の養成・研修の制度や具体的な取り組みの全体像を見ると、十分ではないと感じることが多くありました。中でも特に根本的な課題であると感じたのが、教員を養成する大学、採用する教育委員会、育成する学校の相互理解が不十分であり、さまざまな三者連携・協働の取り組みが行われてはいるものの十分に機能していないということでした。

今回はこうした三者連携・協働の課題と今後期待することについて整理し発信することを通して、ほんの少しでも今学校教育に携わっている方々を支援していきたいと思います。

2▷ 教員の養成、採用、研修を繋ぐ 三者の連携・協働

(1) 「教員育成指標」を核とした育成する人材像の相互理解

教育委員会は文部科学省の教員としての資質の向上に関す

る指針を踏まえ、教員育成のための指標を策定しています。この指標を策定する趣旨は、教員の資質向上を担う教育委員会と教員養成を担う大学の共通認識の下で、教員が高度専門職としての職責、経験及び適性に応じて身に付けるべき資質を明確化することです。大学、教育委員会、学校の三者は、教員の資質向上がこの指標を基に図られるものであること、そして、特に採用前の養成期と採用後3年間の基礎期は一貫して養成、育成されるべきものであることを認識する必要があります。しかし、協議会の場でこの指標を踏まえたさまざまな取り組みについて議論されてはいるものの、その内容が大学や学校に浸透せず、存在も認知されていないのが実情です。

大学は、早急に関係する教育委員会が示す指標を指針として、養成する教員像や教職科目の授業、大学独自に実施している教員養成プログラムの目的、内容・方法を整理し直す必要があります。具体的には、各授業や講座において現在求められている主体的・対話的で深い学び、個別最適な学びや協働的な学び、ICTの活用等を取り入れた学習を体験させ、学生同士が学び合い高め合える集団に育成することを通して、「新たな教師の学びの姿」にある「探求心を持ちつつ自律的に学ぶ「主体的な姿勢」」を育成し、採用後の教員の基礎を形成する第1ステージへと繋げられるようにすることです。

また、学校は配置された新規採用教員について、指標に示されている資質能力の定着状況を踏まえて育成計画を作成し、養成から育成へと一貫性をもって継続的に研修に取り組ませていくことが大切です。不十分な状況であれば実態を報告し、養成の充実を求めることも必要であると考えます。

(2) 学び続ける教員の育成に向けた一体的な改革の推進

これからの時代に学び続ける資質・能力をもった子供を育む

ためには、教員も、教員を支える研究者・教育行政関係者も、探究心をもって学び続ける必要があります。しかし、コロナ禍の間は、数年にわたり学校外の研修が制限されたこともあり、特にこの期間に採用された先生方の研修への参加意識や自己研鑽の意欲もあまり高まりませんでした。終息して2年が経ちますが、こうした若手の先生方の研修への参加意識は依然として高まらずにいるのが現状です。

「学び続ける教員」を育てるためには、三者の連携・協働の下で、継続的に授業改善を行うことができる教員の育成を目指して、養成・採用・研修を繋ぐ研修プログラムを開発するとともに、そのプログラムを支えるシステムを確立するという一体的な改革が必要であると考えます。具体的には、①受講者が研修後にどのような学習機会をもつかまでを見越し、その機会を準備することで学びの持続性を保証すること、②受講者が学んだ内容について実践を行い、結果についてさまざまな角度から語り合って理解を深めることができるように、初任者・管理職・指導主事・大学教員など多層の関係者が研修に関わるという重層性を保証すること、そして、③受講者が同程度の熟達度（例えば初任者同士）で交流できるなど、ニーズに応じて水平展開することで学びの発展性を保証することです。

三者が知恵を出し合ってプログラムをデザインし、これらの条件を満たすシステムを形成することが求められています。

3 D 理論と実践の往還の実現に向けた 三者の連携・協働

学校現場は今、高度化、複雑化した課題をさまざま抱えています。採用後にこうした課題に即座に対応できるようにするためには、教育実習をはじめ学校でのさまざまな体験活動を通して「理論と実践を往還できる省察的な学び」を実現し適切な対応の仕方を習得していくことが必要です。教育委員会や学校が学生に対し、生徒の日々の授業や宿泊行事の支援など、さまざまな体験の機会や場を用意しています。しかし、最も重要な体験機会である教育実習を行う上で、大学と学校、教育委員会の三者がそれぞれの役割と責任や実習の内容などについて確認し合う機会はなく、共通理解のないまま実習が行われているのが現状です。

例えば、タブレット端末を活用した授業実践や対話的・協働的な学びなど、今求められている学習等に関する実習生への具

体的な指導をはじめ実習生の受け入れ体制や環境に学校間、及び教員間で格差があり、全ての学生に対して同等同質の学びを保障できていないのが現状です。また、その格差が学生に不安や焦りなど精神的ダメージを与えていることも事実です。

こうした格差を解消するためには、三者連携による教育実習の連絡協議会を実施し、教育委員会が学校に指導助言したり、大学も学校に相談したりするなど話し合う機会を設けるとともに全ての学校に確実に伝達していく必要があります。

一方、大学の側でも、教員にはならないが教員免許は取得したいという理由で実習に参加し、消極的な態度を表面に出している学生も少なくなく、先生方に不快感を与えていることも事実です。こうしたことから、大学には「事前事後の指導」の授業を中心に改めて一人一人の目的意識に応じた適切な指導を行い、使命感や責任感を含め、実習へのモチベーションを高めていくことが必須であると言えます。

4 D 終わりに

「Society 5.0の実現に向けた教育・人材育成に関する政策パッケージ」では、初等中等教育で育まれた子供たちの多くが、大学で学んだり、企業で仕事をしたりするという意味で、大学や企業も初等中等教育の当事者と言えるとして、次の2点を企業・大学関係者へのメッセージ・期待として述べています。

①今社会が必要とする探究的な学びや認知の特性や関心に応じた学びに転換できるかどうかは、大学や企業の力が大きく、特に、探究やSTEAM教育には、大学や企業のリソースの提供が欠かせない。

②社会一丸となって、この学びの転換に取り組むべく、初等中等教育のいわば当事者として、是非、子供たちのために協力していただきたい。

私自身も大学教員として、このメッセージ・期待を真摯に受け止め、より一層、初等中等教育から高等教育への縦のつながりを意識し、初等中等教育の当事者として積極的に実践的研究を展開し、新たな知見や解決法を実践現場である学校に還元できるよう努めていきたいと思っています。



参考

- 「教育委員会と大学の連携による教員研修プログラムに関する調査報告書」の概要について(国立教育政策研究所)
- 「Society 5.0の実現に向けた教育・人材育成に関する政策パッケージ」(2022.6.2 総合科学技術・イノベーション会議)

かぞ 地元(埼玉県加須市)の算額の 中学校数学での活用と 算額文化の普及



かぞ算額文化保存会監事
前 加須市立加須北中学校 校長
現 加須市立騎西中学校 主幹教諭

中里 孝 / なかざと たかし

算額とは

算額とは、江戸時代から現代まで和算家が考案した数学(和算)の問題や解答を板に記して、神社や仏閣に奉納した額のことであり、広い意味では絵馬の一種である。また、和算は、江戸時代、日本国内で独自の発展を遂げた数学であり、算額は日本独自のものである。算額奉納の理由は、難問が解けた感謝の意など和算を学んだ記念が主なもので、近年では紛失した額や古くなった額を再生し奉納したものもある。算額には、赤や青の色彩を施したきれいな図形が描かれ、文面は漢文で書かれていることが一般的で、「今有如図…」と始まる問文、「答曰…」という答文、「術曰…」として一般解を述べる術文の三部構成の記述様式となっている。算額は、“Japanese Temple Geometry”と訳され、海外においても注目されている。

加須市の算額について

現在、日本には約1,000面の算額が現存していると言われるが、その多くは江戸時代後期から明治期のものである。また、現存数の多い地域は、福島県、岩手県、埼玉県、群馬県で、その埼玉県の中でも加須市には28面の算額が存在した記録と、少なくとも22面の算額が現存していた記

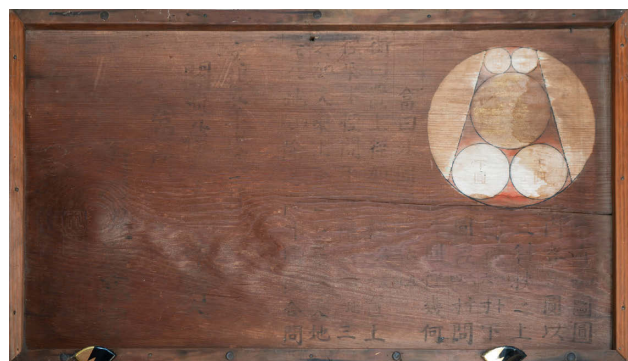


図1 三宮寺の算額 奉納者:角田浅之丞(文化5年 奉納)

録がある。加須市の算額の多くは明治期のもので、加須市を含む周辺地域では、江戸時代後期から明治・大正期にかけて和算が盛んに行われていたようである。現在、加須市内で現存が確認できている算額は、12面である。

算額を中学生に紹介

私が以前勤務していた加須北中学校区には2面の算額が現存している(とげぬき地蔵尊と天神社の2か所)。その内容を学校だよりに掲載して、生徒および保護者、地域の方にこの地域の和算文化や算額の存在を紹介した。



図2 学校だよりで算額を紹介

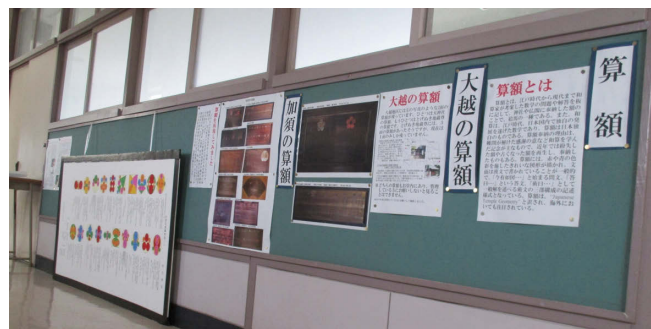


図3 廊下の掲示物で算額を紹介

また、廊下に算額コーナーを設け、校区内の算額と加須市内に残る算額を写真と説明を付け加えた掲示物で紹介した。さらに、加須市種足地区の和算家 都築利治の門人らが埼玉県さいたま市の大宮氷川神社へ明治31年に奉納した算額の問題を紙上に再現したものを設置し、生徒に算額の問題が具体的にわかるようにした。視覚と説明文とで、生徒が和算や算

額に親しみがもてるよう工夫した。また、掲示物の内容をまとめたプリントも用意し、興味をもった生徒や来校者が自由に持ち帰ることもできるようにした。時折、不思議そうに眺め、算額がある神社について話題にしている生徒を目にするが、やはり、算額の問題は中学生が解くには難しいようである。

■ 中学校数学での活用 (算額を解く)

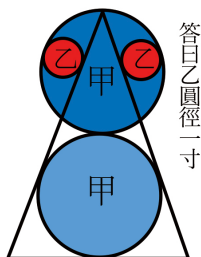
算額の問題は、難しい問題から簡単な問題まで様々である。比較的簡単な問題は、「基本的な図形の性質」「三平方の定理」「二次方程式」などを利用して解くことができる。中学生でも「2円の位置関係の性質」を習得すれば解くことができる問題があるが、前述したように中学生が解くには難しく、少なくとも中学校卒業程度の数学の知識が必要である。そこで、中学3年生の入試が終わり、数学に興味・関心が高い生徒に算額の問題を出題した。その問題を以下に紹介する。問文および答えは、漢文の内容と現代文の内容を示す。なお、術文は省略する。

① 加須市騎西 玉敷神社の算額から

<問題(現代文)>

図のように甲円(青円) 2個と2本の斜線、2個の乙円(赤円)がある。甲円の直径を3とすると、乙円の直径を求めよ。

<答え> 乙円の直径1



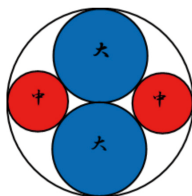
今有如図隔甲圓二個二斜甲乙圓各二個只言甲圓徑三寸問乙圓徑幾何
答曰乙圓徑一寸

② 加須市外野 とげぬき地蔵尊の算額から

<問題(現代文)>

図のように外円の中に大円(青円) 2個と中円(赤円) 2個がある。外円の直径を6とするとき中円の直径を求めよ。

<答え> 中円の直径2



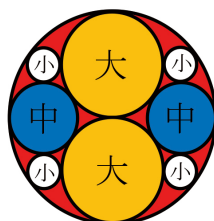
今有如図外圓内容大圓二個中圓二個只言外圓徑六寸問中圓徑幾何
答曰中圓徑二寸

③ 加須市騎西 玉敷神社の算額から (②の発展問題)

<問題(現代文)>

図のように円(赤円)の中に大円(黄円) 2個、中円(青円) 2個、小円(白円) 4個がある。外円(赤円)の直径を6とすると、小円(白円)の直径を求めよ。

<答え> 小円の直径1



今有如圖圓ノ内ニ容大圓二個中圓二個小圓四個只言外圓徑六寸問小圓徑如何
答曰小圓徑一寸

是非、解いてみてください。

■ 加須の算額を広める活動

私は、現在、地元の「かぞ算額文化保存会」に所属し、地元加須の算額文化の普及・啓発活動を行っている。その活動のひとつとして、加須市のPRと日本独自の文化である算額について多くの方に知っていただくとう算額を神社に奉納した。奉納場所は、かぞ算額文化保存会の内田会長と縁のある東京日本橋福德神社である。

福德神社は、別名を「芽吹稲荷」と称し、江戸時代から続く「日本橋のお稲荷様」として多くの参拝者が訪れる神社である。参拝者の中には算額に注目する方も少なくなくない。

算額の問題は、加須市の算額から選び、問題の内容がわかるように漢文表記ではなく、現代仮名遣いで表記した。また、採用した問題のもととなる算額の解説と問題の現代解法例を示したリーフレットも添えている。

今後も算額の保存活動や算額文化の継承、さらには、中学生をはじめ多くの方に算額や和算について紹介していきたいと考えている。❖



図4 福德神社の算額
令和5年に奉納した算額(上段)
※下段は令和2年に内田会長が奉納した算額

<訂正のお知らせ>

前号(No.42)のp.15に掲載した優秀賞の名称に誤りがございました。お詫びして訂正いたします。
(誤)新学社 → (正)新学社賞

..... 編集後記

当法人は内閣府より公益認定を受け、2025年4月1日をもって公益財団法人に移行いたしました。今後はより一層の公益性と透明性をもって社会貢献活動に取り組んでまいりますので、引き続き、ご指導ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

(公財)理数教育研究所 事務局

「数学用語」その6

指数と3つのe

サイエンスナビゲーター® 桜井 進/さくらいすすむ

指数に関する3つのeとは「指数関数exponentialのe」「ネイピア数e」そして「数学者Eulerのe」。

指数を表す用語は16世紀に2つ考え出されています。ラテン語の「露出する」を意味するexponentemからexponensが造られ、英語のexponentialになりました。さらにラテン語のindex（英語でもindex）が指数を表す用語として使われるようになりました。こうしてexponentialとindexが指数を表す用語として使われるようになりました。

筆者がはじめてexponentialを知ったとき、真っ先に連想したのがexplosion「爆発」。指数関数には指数関数的爆発・指数的爆発という表現があるからです。

英語で指数に2つの用語があるように、日本語でも似た状況（英語よりも面倒）があります。 a^b の演算結果は幂ですが、 a^b の演算には「幂乗（べき乗）」と「累乗」の2つの用語があります。幂＝冪（べき）＋幕ですが、「冪」は布で物を覆うこと、「幕」でおおい隠すことを表します。幂の略字が「巾」。累とは、重ねることです。累乗は「重ねた乗算」の意味です。わが国の教科書では累乗が使われています。幂は常用漢字・当用漢字には含まれていません。そこで代わりに使われることになったのが平仮名の「べき」と「累」です。

元々の幂の後から使われることになる累ですが、使い方に違いがあります。指数が自然数の場合の幂乗を累乗と区別する使い方もありますが、幂乗・べき乗・累乗はほとんど同じ意味で使われます。演算結果は幂であり、累とはいいません。また、幂級数・巾級数という数学用語がありますが、これも累級数とは言いません。

閑話休題。explosion「爆発」を連想させる exponential ですが、筆者は第一義として「指数関数」ではない意味があり、第二義として「指数関数」の意味があるのだと思っていました。「外へ」を意味する接頭辞「ex-」はついた単語はたくさん（筆者の電子辞書には1583個確認）あります。数学用語としても、expand「①広げる④[数学]式を展開する」、expression「①表現⑤[数学]式、記号、表現」、exact「①正確な②厳密な④[数学]〈微分方程式が〉完全な」などがありますが、どれも第一義は数学の意味ではありません。exponentialもそうだろうと思いました。ところがそうではないことを知りました。

「exponential って、指数関数だけの意味なんだ。一にも二にも指数関数、三四がなくて五に指数！」だったのです。

関数電卓にある「exp」キーとは指数関数exponentialの頭文字3文字のこと。関数電卓で「1」「exp」「=」とキーを叩けば、2.7182828459045が返ってきます。これがネイピア数eです。指数関数expの正体は、eのx乗（ $\exp(x)=e^x$ ）です。数学定数eには2つの呼び名があります。自然対数の底そしてネイピア数です。

1614年に、城主ジョン・ネイピアは『Mirifici Logarithmorum Canonis Descriptio』の中でlogarithmおよび対数表を公表しました。当時、小数点（「.」はネイピアの発明）はなかったので、次のようなネイピアの対数を載せることはできませんでした。

$$\text{Sinus } \theta = 10000000 \times 0.9999999 \quad \text{Logarithms}$$

ネイピアの対数

ネイピアの対数の底は0.9999999だったのです。ここに秘められたデザインの神髄を語るには紙数が少なすぎます。眺めるだけに話を進めます。時代が進み18世紀、スイスに神童レオンハルト・オイラーが誕生します。数学者となったオイラーは1748年に『無限小解析入門』を著します。オイラーはこの中で呪文のようなネイピアの対数の謎解きを鮮やかにやっつけました。オイラーはネイピアの対数に隠れていた定数2.718...を発見します。オイラーはこの数をeと表しました。eはEulerのeではないかと思われていますが、本当のところはわかりません。はたして定数eのおかげでcalculus「微分積分学」は完成しました。『無限小解析入門』の章立ては現在の微分積分学の教科書のそれとまったく同じであることに驚くばかりです。このように定数eはオイラーがネイピアの対数の中から発見したのでネイピア数と呼ばれています。

オイラー以上に驚いているのはネイピアでしょう。

「まさか自分の対数の中にeがあったなんて！」