

腎機能の理解を促すための教材開発と中学校理科における授業実践

安藤 元紀^{*1} ・ 池田 理佐^{*2} ・ 田中 福人^{*2}

本研究では腎臓におけるろ過後、ろ液の成分がどのような物質で構成されているのか、その後の腎臓での再吸収過程を含めて、中学生の腎機能の理解を促す教材開発を試みた。まず、市販の果汁を含む飲料水をメンブレンフィルターでろ過し、ろ液が透明になるのは不溶性物質が除去されるためであること、また、ろ液の甘さから水溶性の糖分はろ過されることを確認した。開発した腎臓糸球体モデルは、腎小体に見立てた蓋に孔を開けたプラスチック容器、赤血球や血液中に存在する様々な物質を模した色や大きさの異なるビーズ、から構成される。生徒は、この教材を用いた授業実践を経て、血球以外の水溶性成分は要不要に関わらず一旦腎小体でろ過されてしまうこと、生体に必要なブドウ糖は尿細管において能動的に再吸収されることを理解し、腎臓のろ過と再吸収に関する新しい考え方と関連する概念を獲得することができた、と考えられた。本研究で開発した教材を用いることにより、生徒の腎臓の役割についての理解を深化させること、同時に自身の健康への関心を高めさせること、について有効であることが分かった。

キーワード：腎単位、膜輸送体、糖尿病、血液循環、生物教育

I. 序論

平成29年改訂の中学校学習指導要領解説理科編において、第2学年の「動物の体のつくりと働き（生命を維持する働き）」では、動物の体が必要な物質を取り入れ運搬している仕組みがあること、併せて不要となった物質を排出する仕組みがあることを学習する。物質交換と関連付けて理解させることがそのねらいの一つとなる。不要な物質の排出に関しては「血液中の不要となった物質を体外に排出する腎臓の働き」について触れることとされ、その内容は「腎臓におけるろ過機能と尿素の排出」が主題となる。中学校理科第2学年の教科書では発展的な内容として腎臓のろ過と再吸収の図が示されている程度である（大矢ら、2025；永原ら、2025）。腎機能は、生理学的観点から言えば、エネルギーに依存した再吸収過程にその本質があるにも関わらず、中学校の学習段階においては「腎臓は尿素の排出器官」という短絡的な結論に導かれてしまう危惧がある。

中学校学習指導要領によれば「動物の体のつくりと働き」を理解させるための教材として魚類を解剖して内部のつくりを観察することが示されている。また、解剖実習に代替したプラスチックモデルによる観察実習が提案されている（佐伯ら、2023）。特に腎臓を題材とした教材として、高等学校ではブタの腎臓を用いた解剖実験が報告されているが、解剖することへ抵抗感を持つ生徒も多いとされる（野崎・片山、2017）。生徒の実情を把握

Development of Educational Materials to Promote Understanding of Renal Function and Classroom Implementation Using the Developed Materials in Junior High School Science Learning

^{*1} 岡山大学学術研究院教育学域，700-8530 岡山市北区津島中3-1-1, Motonori ANDO, Faculty of Education, Okayama University, 3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama 700-8530

^{*2} ノートルダム清心学園 清心中学校・清心女子高等学校，701-0195 倉敷市二子1200, Risa IKEDA and Fukuto TANAKA, Seishin Junior High School/Seishin Girls' High School, 1200 Futago, Kurashiki 701-0195

した上で、臓器構造の理解とその機能を推測させるためのモデル化が重要な役割を果たすと考えられる。

本研究では、腎機能の理解を促すための糸球体ろ過過程を再現するモデル教材を開発し、それを用いて授業実践を行うこと、を目的とする。まず、糸球体での「ろ過」現象を模した不溶性の色素成分と糖分を含む水溶液をシリンジフィルターでろ過し、ろ液の成分がどのような物質で構成されているのかを確認させる。その上で、開発した糸球体モデル教材を用いて、腎小体におけるろ過前後の物質の動きを再現し、続く尿細管において何が起きているのか、を物質の移動という視点で考察させる。

II. 教材開発

1. 教材が示す生物学的意義

腎機能は糸球体におけるろ過とそれに続く尿細管における必要な物質の再吸収過程から成る。糸球体毛細血管を構成する内皮細胞は「窓」(fenestration)と呼ばれる 100 nm 程度の細孔を有する。細胞成分以外の水溶性成分はろ過圧により尿細管管腔側に漏出する。結果として、原尿には要不要に関わらず水溶性成分が含まれることとなる。このように、糸球体におけるろ過機能はあくまでも物理的な篩いとしての役割に過ぎず、腎機能の本質は原尿からの水分と電解質の再吸収過程にある。即ち、腎臓内の皮質・髄質間の大きな浸透圧勾配を背景として、一次性・二次性の能動輸送体および促進拡散型に分類される多様な膜輸送体の連携により、全体としてエネルギー依存的な物質の再吸収を行っている。ろ過直後の原尿に含まれる水、ブドウ糖、アミノ酸、各種イオン(電解質)は、尿細管管腔から尿細管構成細胞を経て間質、毛細血管へと移動する。尿細管における再吸収は上皮輸送により行われている。糸球体における 1 分間あたりのろ過量(原尿)を 120 mL とすると、その内、体外に排泄される量はわずか 1~2 mL とされる。水分の再吸収を含めた極めて激しい物質輸送を行っていることが想像できる。

一例として近位尿細管における糖輸送と上皮輸送を説明する。ブドウ糖は、上皮頂端膜に発現している二次性能動輸送体(SGLT 型)およびその基底側膜に発現している促進拡散型輸送体(GLUT 型)を介して、尿細管管腔側から組織側(血管側)に輸送される。腎臓の再吸収過程で機能しているとされる膜輸送体分子の発現を確認するため、常法に従い(Ando and Takeuchi, 1999)、マウス腎臓の凍結切片を作成し免疫組織化学的手法により解析した。本実験は岡山大学動物実験規則に従い、岡山大学動物実験委員会の承認のもとに実施した。観察は本学共同機器の共焦点レーザー顕微鏡で行った

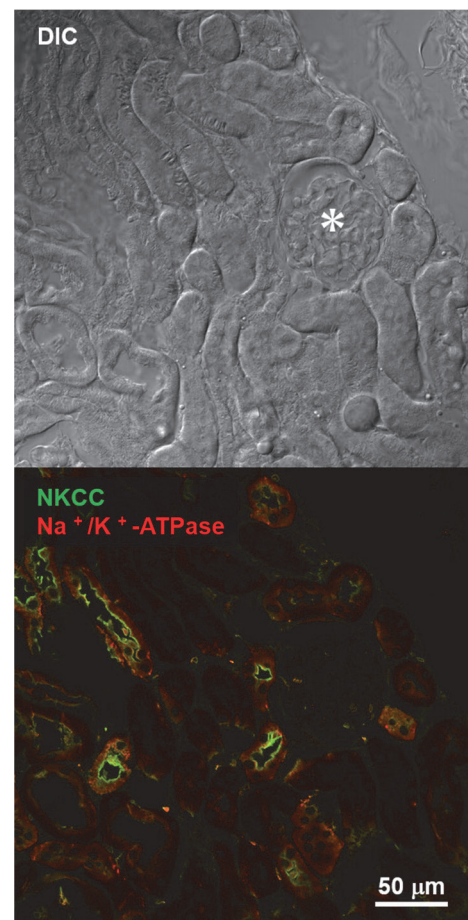


図1 マウス腎臓皮質における糸球体および尿細管の同一視野の透過像(上)と蛍光免疫組織像(下)
*, 糸球体

(FV3000, Olympus, Tokyo, Japan)。腎臓皮質の透過像と同一視野の蛍光像を示す(図1)。透過像において、皮質表層部の糸球体(*)と組織切片全体に広がる尿細管が確認できる(図1上)。蛍光像において、尿細管に発現している $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{ATPase}$ (Na^+ pump) (赤) および $\text{Na}^+-\text{K}^+-2\text{Cl}^-$ 共輸送体 (NKCC) (緑) の陽性シグナルを示す(図1下)。 Na^+ pump は尿細管に広範囲に発現し、NKCC は一部の尿細管に特異的に発現していることが確認された。多様な膜輸送体分子が尿細管部位特異的に発現していることから (Pech et al, 2012), これらの分子が協働することにより、腎臓が生体内で最も重要な機能の一つとなる体液の恒常性維持を担っていることを理解できる。

2. 教材について

(1) シリンジフィルターを用いたろ過実験

糸球体におけるろ過過程を理解するための教材として、親水性のナイロンシリンジフィルター(孔径 $0.45\ \mu\text{m}$, NY025045, Membrane Solutions)を用いた観察実験を行った(図2)。市販の果汁を含む飲料水をシリンジフィルターでろ過すると、孔より大きな不溶性成分はフィルターにトラップされるため、ろ液は透明な液体となる。物質を大きさで分けるというろ過機能を体験すると同時に、血液を想定した場合、不溶性成分である血球細胞はろ過されないこと、水溶性成分である糖分はろ液に含まれることを予想することができる。



図2 シリンジフィルターを用いたろ過実験

(2) モデル化による糸球体ろ過過程の再現

糸球体におけるろ過を理解するための教材を作製した(図3)。スクリー式の容器の蓋に孔を開け、その孔径によって血液中の成分に見立てたビーズを選別できるようにした。容器にビーズを入れた後、孔の開いた蓋を間に挟むように空の容器を向かい合わせにし、それを左右に揺らすことにより、蓋の径より大きい血球に見立てたビーズは孔を通過できないことが分かる。一方、蓋の径よりも小さいブドウ糖や尿素に見立てたビーズは下側の空容器に落ちてくることが分かる(図4)。細胞成分はろ過されず、水溶性成分が原尿に含まれていることを理解させることができる。

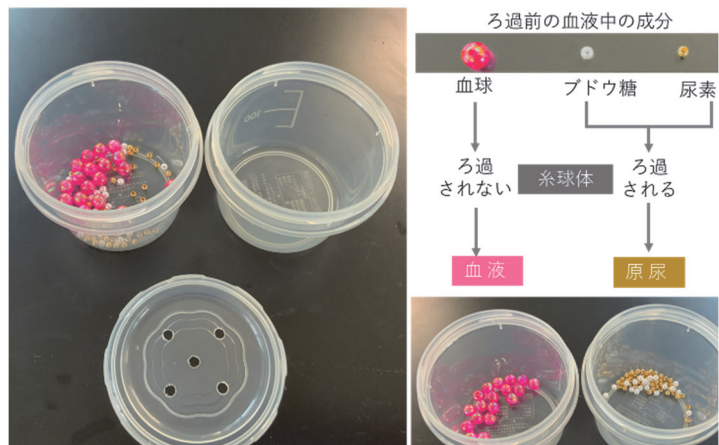


図3 糸球体ろ過過程をモデル化した教材

(3) モデル化による尿細管再吸収過程の再現

尿細管における再吸収を理解させるため、上述した(2)のようにビーズをふるい分けた状態(原尿)の容器から、手作業でブドウ糖(水溶性成分)に見立てたビーズを血液の容器へ移動させる(図4、再吸収)。この水溶性成分に見たてたビーズの選別作業を通して、ブドウ糖の再吸収がエネルギーに依存していることを実感させることが可能となる。同時に、再吸収される物質と再吸収されない物質について考察できる。



図4 糸球体モデルによるろ過前→ろ過中→ろ過後→再吸収の各過程の再現

Ⅲ. 授業実践

1. 実践を行った対象

2023年11月に岡山県内の中学校2年生3クラス（83人）を対象に腎機能を理解するための実践授業を行った。本授業前に生徒に事前のコンセプトマップを作成させた。本時の授業内容を表に示す。生徒は3～4人のグループに分けて実験を行った。

2. 実践の内容

シリンジフィルターを用いたろ過実験では、シリンジフィルターは小さな孔を持つことを説明し、ろ過とはどのような現象かを想起させた。腎臓のはたらきの一つにろ過があることを説明した。そして、腎臓には血管がつながっており、血液から尿がつくられていること、およぼろ過された後のろ液は尿の元（原尿）であることを説明した。前時まで学習している内容として、血液には血球細胞（赤血球・白血球・血小板）が含まれること、水溶性成分としてブドウ糖・尿素などが含まれていることを確認した。

糸球体ろ過過程をモデル化した教材を用いて、蓋の孔の径より大きいビーズ（血球）と小さいビーズ（ブドウ糖と尿素）をふるい分け、原尿にはブドウ糖と尿素が含まれていることを確認させた後、最終的な尿に含まれる成分について考えさせると同時に、考えた理由をホワイトボードにまとめる活動を行った（図5）。

表 本時の授業内容

授業内容	学習活動
導入 (10分)	○シリンジフィルターによるろ過実験 ・果汁入りジュースをろ過することにより、色素はろ過フィルターにトラップされ、ろ液は無色となり、その中には水溶性の糖分などが含まれることを確認する。
展開 (25分)	○モデル化による糸球体ろ過過程の再現 ・血液成分（血球、ブドウ糖、尿素）を模したビーズを孔のある蓋により選別する。 ・孔径より大きいビーズ（血球）は通過せず、小さいビーズ（ブドウ糖、尿素）は通過し、ろ液（原尿）に含まれることを確認する。 ○モデル化による尿細管再吸収過程の再現 ・ろ液（原尿）に含まれる小さいビーズ（ブドウ糖、尿素）の内、ブドウ糖のビーズのみを手作業で血液の容器に移動させる。 ・原尿と排泄される尿の成分の違いについてグループで話し合いまとめる。
まとめ (15分)	○本時の学習内容の振り返り ・腎臓のつくりとその働きを振り返り、実験の結果と考察をまとめ、コンセプトマップ（自由記述を含む）を作成する。

尿に含まれるのは、 尿素 だけだと思います。 理由。 ブドウ糖は かつ よう なから → エネルギー → 脳 など	尿に含まれている物 尿素 : ブドウ糖 7 : 3 (理由) ブドウ糖は 体に 必要 な物 尿素は いら ない から
---	---

図5 生徒が記述したホワイトボードの例

腎臓の中でどのような過程を経るのかを問い、体にとって要・不要という視点で考えることにより、体に必要な物質であればそれは血液側に移行するのではないかと、一方で不要な物質は尿の主要な成分としてそのまま排出されるのではないかと生徒が気づくよう促した。多くの生徒はブドウ糖が体にとってエネルギー源として必要なものであることを認識していたが、尿としてブドウ糖が一部排出されると予想したグループもあった。腎臓の病気の一例として糖尿病という言葉を知っている生徒がいたことから、尿に糖が含まれることは病気の一つとなり得ることに気付かせ、腎臓が正常に機能している場合は排出される尿にはブドウ糖が含まれていないことを想起させるようにした。同様に、ブドウ糖が過剰に血液中に含まれると再吸収が追いつかず糖が排出される場合もあることを説明した。授業のまとめでは、血液には血球・ブドウ糖・尿素以外にもアミノ酸・電解質も含まれていることを伝えた。腎臓で生成された尿が排出されるまでの流れを説明し、ろ過と再吸収の過程について図で示した。さらに、今回の実験では水の再吸収は扱わなかったが、本来は水についても再吸収が行われていることを説明した。

Ⅳ. 授業評価

授業前後に「腎臓に対するイメージを書いてください」という質問で生徒にコンセプトマップ（概念図）を作成させた。コンセプトマップに書かれた単語を「項目」、単語同士をつないだ線を「リンク」とし、授業前後における項目数およびリンク数の増減を解析した（村瀬・早津，2006；福谷・皆川，2020）。授業前に書かれたコンセプトマップにおける項目数（平均値±標準誤差）は 12.87 ± 1.06 であったのに対し、授業後は 13.58 ± 1.18 であり、若干増えたものの有意差は認められなかった。リンク数（平均値±標準誤差）は授業前が 11.88 ± 0.75 であったのに対し、授業後は 12.77 ± 0.79 であり、こちらも有意差は認められなかった。次に、生徒が書いたコンセプトマップについて「AI テキストマイニング (株) User Local AI テキストマイニング; <https://textmining.userlocal.jp/>）」による解析を行った。

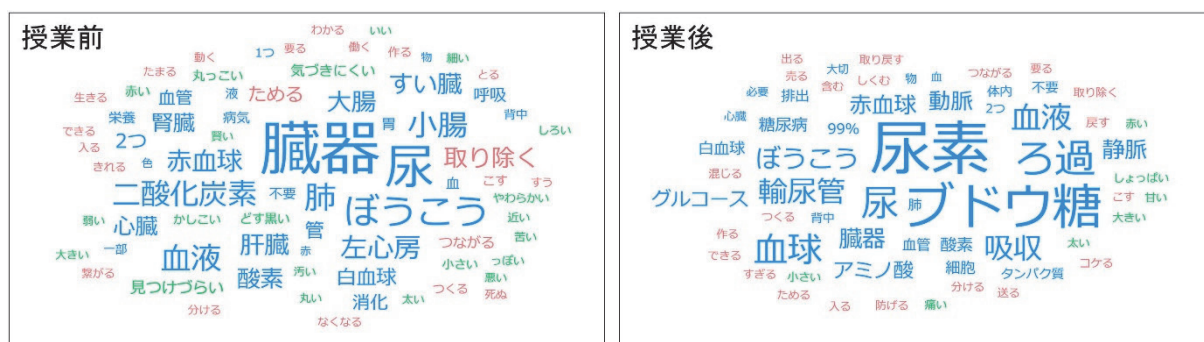


図6 ワードクラウドによる授業前後の比較（名詞・動詞・形容詞）

スコア（与えられたマップの中でその単語がどれだけ特徴的であることを表したもの）が高い単語を複数選び出し、その値に比例させた字の大きさを示した（図6）。単語の色は品詞の種類を意味し、青色が名詞、赤色が動詞、緑色が形容詞を表している。授業前のコンセプトマップでは「臓器」「尿」「ぼうこう」といった単語のスコアが大きかった。腎臓については、小学校第6学年の「人の体のつくりと働き」において排出に関係している臓器として扱われており、小学校で習った内容をもとに生徒のイメージが作りだされていると考えられた。それに対し授業後のコンセプトマップでは、「尿素」「尿」「輸尿管」といっ

た排出に関係する単語がみられることに加え、「ブドウ糖」「ろ過」「吸収」といったろ過と再吸収に結びつくイメージが新たに生じていることが分かった。授業後の自由記述には、「吸収したときに体に必要な栄養分も含まれているから、それを再吸収して、血液もついている」といった腎臓の機能に触れた記述をした生徒がいた。さらに「ブドウ糖は必要なのに、なぜ尿素と一緒にわざわざろ過されるのだろうか」と疑問に思った」という考えをきっかけとして、細胞で行われている物質輸送が、不要なものではなく、必要なものを取り込む（再吸収する）しくみであることに気づいた生徒がいることも分かった。

V. おわりに

授業実践の結果から、本研究で開発した教材を用いることで腎小体では生体にとって必要不可欠な成分もろ過されてしまうこと、排泄される尿にはそれらは含まれていないことを理解させることができた。加えて、正常な腎臓の役割の一つとなるブドウ糖の再吸収を想起させることができた。本教材を用いることで、腎臓が正常に機能しない場合、例えば血尿や糖尿といった病態についても生徒たち自身で考察していくことが可能であることが分かった。糸球体ろ過過程のモデル化に使用した蓋の孔の径を大きくすることで、本来ろ過されない血球が尿に混じる様子も再現され、血尿を予想させることもできる。本教材を用いて、生徒のヘルスリテラシーを育成することも可能であると考えている。

現行の学習指導要領では、これまで生物基礎の内容であった肝臓や腎臓の働きを学習する項目がなくなった。しかし、日本学術会議基礎生物学委員会・総合生物学委員会合同生物科学分科会に設置された生物科学分野教育用語検討小委員会により報告されている語句の中で、「解毒作用」、「胆汁」、「再吸収」といった腎機能に関する用語は重要であるとされる（中道，2020）。指導者がその重要性を認識し、小学生から高校生までの発達段階に応じた腎機能に関する学習教材を用いることで、正常な腎臓の役割を理解させる実践を行っていききたい。

付記

本稿は、安藤と池田が共同で企画・執筆した。安藤は教材開発および腎組織の解析、池田は授業実践、田中は授業評価、をそれぞれ担当した。安藤が最終原稿を調整し著者全員で確認した。尚、本研究成果の一部については、第 108 回日本生物教育学会大会（2024）に於いて、池田が筆頭演者として口頭発表を行った。

参考・引用文献

- Ando M, Takeuchi S. (1999) Immunological identification of an inward rectifier K^+ channel (Kir4.1) in the intermediate cell (melanocyte) of the cochlear stria vascularis of gerbils and rats. *Cell and Tissue Research*, 298:179-183.
- Pech V, Thumova M, Kim YH, Agazatian D, Hummler E, Rossier BC, Weinstein AM, Nanami M, Wall SM. (2012) ENaC inhibition stimulates Cl^- secretion in the mouse cortical collecting duct through an NKCC1-dependent mechanism. *American Journal of Physiology-Renal Physiology*, 303: F45-F55.
- 佐伯英人，水野晃秀，松永武（2023）「解剖実習」と「プラスティネーション標本の観察」に関する一考察—中学校理科の第2学年「動物の仲間」において—．理科教育学研究

63(3):563-571.

中道貞子（2020）高等学校生物教員が選んだ「生物基礎」の重要用語に関する考察．生物教育 61(3):150-159.

野崎真史，片山 豪（2017）理科中等教育における解剖実験の課題と意義．日本科学教育学会研究会研究報告 3(5):189-194.

福谷泰斗，皆川直凡（2020）コンセプトマップを用いた主体的・対話的な学びによる知識の深まりの検討ー中学校社会科(地理的分野)における授業実践の試みー．鳴門教育大学情報教育ジャーナル 17:9-18.

村瀬公胤，早津 秀（2006）コンセプトマップによる総合的な学習の時間の評価ー白井市立大山口小学校の事例ー．信州大学教育学部附属教育実践総合センター紀要教育実践研究 7:61-70.

文部科学省（2017）中学校学習指導要領解説 理科編．（アクセス 2025.11.17）

https://www.mext.go.jp/content/20210830-mxt_kyoiku01-100002608_05.pdf

大矢禎一ら（2025）未来へひろがるサイエンス 2．啓林館．令和 6 年 検定．

永原裕子ら（2025）新しい科学 2．東京書籍．令和 6 年 検定．