

福井工業高等専門学校

研 究 紀 要

自然科学・工学

第 53 号

RESEARCH REPORTS OF NATIONAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (KOSEN),
FUKUI COLLEGE
NATURAL SCIENCE AND ENGINEERING NO.53

DECEMBER 2019

目 次

福井高専が所蔵するセレン整流器の電気特性評価と 高専教育での再活用について……………	<u>秋 山 肇</u> <u>松 浦 徹</u> ……………	1
越前焼陶器の漬物容器としての活用……………	橋 本 貴 幸 上 島 晃 智 後 反 克 典 山 内 孝 紀 <u>高 山 勝 己</u> ……………	7
ウリカーゼ固定化尿酸バイオセンサの開発……………	山 田 美 空 <u>坂 元 知 里</u> ……………	11
降雪時の水源井戸の揚水能力低下の検証……………	<u>奥 村 充 司</u> ……………	15
鯖江断層北部と福井平野－鯖江断層南部との関連－……………	<u>岡 本 拓 夫</u> ……………	19
ホウ酸バリウム系ガラスにおける β -BBO 結晶の析出と TTT 図 ……………	<u>長谷川 智 晴</u> ……………	23
体育授業におけるストロボ画像を用いた動きの自己分析の試み： 高専男子学生の走幅跳パフォーマンスに及ぼす効用……………	<u>松 井 一 洋</u> <u>東 章 弘</u> ……………	29

* 下線は投稿者

CONTENTS

About the electrical characteristic evaluation of the selenium rectifier that is owned by Fukui Technical College and reused for Technical College education	<u>Hajime AKIYAMA</u> Toru MATSUURA	1
Use of Echizen ware as a pickle container	Takayuki HASHIMOTO Akinori UEJIMA Katsunori GOTAN Takanori YAMAUCHI <u>Katsumi TAKAYAMA</u>	7
Electrochemical evaluation of uricase immobilized biosensor	Miku YAMADA <u>Chisato SAKAMOTO</u>	11
Verification on reduction of pumping capacity of well for waterworks during snowfall	<u>Mitsushi OKUMURA</u>	15
Northern Part of the Sabae Fault and the Fukui Plain – Induction from southern part of the Sabae Fault –	<u>Takuo OKAMOTO</u>	19
Crystallization of β -BBO in Barium Borate Glasses and TTT Diagram	<u>Tomoharu HASEGAWA</u>	23
A study on self-analysis of the movement using a strobe picture: its effect on college male students' long jump performance	<u>Kazuhiro MATSUI</u> Akihiro AZUMA	29

* The name of an underline means a contributor.

福井高専が所蔵するセレン整流器の電気特性評価と 高専教育での再活用について

秋山 肇^{*1} 松浦 徹^{*}

About the electrical characteristic evaluation of the selenium rectifier that is owned by Fukui Technical College and reused for Technical College education

Hajime AKIYAMA and Toru MATSUURA

It has been 91 years since the selenium rectifier was patented in Japan. The selenium rectifier, a kind of metal rectifier, has made a historical contribution to the development of power electronics. Three historical selenium rectifiers were owned by NIT Fukui College, and they were used for research and education until 2010. The present study aims to deepen understanding of this historical electrical equipment by clarifying the course of the design and manufacturing of these selenium rectifiers and confirming their latest electrical properties.

Keywords : Selenium rectifier, Metal rectifier, Vacuum tube, Mercury-vapor rectifier, Semiconductor rectifier, Silicon rectifier, Historical electric equipment, Power electronics

1. 概説

セレン整流器は金属整流器の一種であり、20世紀前半に欧州で発明された。日本では国内メーカーのプロセス開発によって実用化に到り、半導体整流器への世代交代が行われた1970年代まで水銀整流器をはじめとする電子管と共にパワーエレクトロニクスの基幹デバイスとして産業・民生機器制御に用いられた歴史を有する¹⁾。

福井工業高等専門学校（以下、福井高専と称する）にはセレン整流器が3台保管されており、今回その来歴と規格を調査した上で予備的に電気特性を評価する機会が得られた。高専における専門教育活動に資することを目的として一連の結果を整理し報告する。

高等専門学校は凡そ半世紀以上の歴史を有する高等教育機関であり、相当数の歴史的電気電子機器類を所蔵している。長足の進歩を遂げ続ける電気電子工学分野に於いて、先人の努力と偉業を次世代のエンジニア諸氏に伝える上での課題についても推察したい。

2. セレン整流器について

セレン整流器はアルミニウム等の金属基板上にニッケル被覆を施した上で高純度のセレンウムを真空蒸着することにより金属・半導体接合を形成することで整流特性を有する素子となる¹⁾。図1にセレン整流体の構造模式図を示す²⁾。整流体とは整流機能を有する基本構造であり、整流体を複数個直並列接続することで一定の電圧・電流規格を有する整流器として製品化することが可能となる。

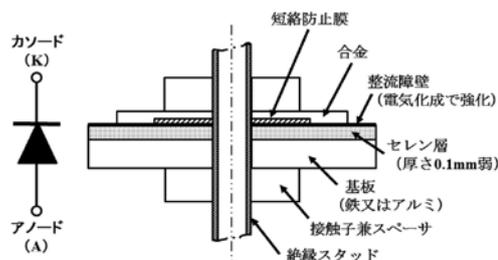


図1. セレン整流体の構造模式図

セレン整流器は亜酸化銅整流器と共に金属整流器の一種として分類される。電力用電子管として普及した水銀整流器と同様に20世紀前半で研究開発された後、半導体整流器の登場によって世代交代した歴史を有する。表1に各種電力用デバイスの研究開発に関する年表を示す^{1), 3), 4), 5), 6)}。

セレン整流器の発明と研究は当初ドイツのSAF(Süddeutsche Apparate Fabrik, GmbH)が先行していた状況から新電元工業株式会社や富士電炉(現株式会社オリジン)等の国内メーカーが製造方法に工夫を加えることで製品化に到る技術の流れを形成していった^{7), 8)}。

3. 福井高専所蔵に係るセレン整流器

福井高専が所蔵しているセレン整流器は3台が確認されており、いずれも「サイリスタ整流装置(又はサイリスタ式可変周波電源装置⁹⁾)、型名:KCMF6-120-150A¹⁰⁾」に実装されていたものである。同装置は1967年(昭和42年)3月25日に納入され電気工学科教棟1階の電気機器実験室に設置された。その後、1992年(平成4年)の独立行政法人化による移管を経て2010年(平成21年)3月10日付で廃棄処分されたことが判明している。福井高専・電気工学科(現電気電子工学科)は1965年(昭和40年)に創設されていることから同装置は創設間もない時期に納入された歴史的電気機器であったことになる。今回の調査では電

源装置の型名までは確認できたものの、製造元や回路設計図等の詳細は確認できなかった。しかしセレン整流器の製造元は新電元工業株式会社であることが判明した。個々のセレン整流器は外見上特段の損傷や変形は認められず保存状態は良好であると判断される。

3台のセレン整流器に各々「標本体A(以下B, C)」とタグ付を行い、仕様規格情報^{2), 11)}と照合した。標本体Aは図2に示すように、指定位置に於ける型番記載が無かったことから「型番:記載無し」と判断したが、各整流体を封止している冷却板の寸法から型番「R50」に相当するのではないかと考えられる。

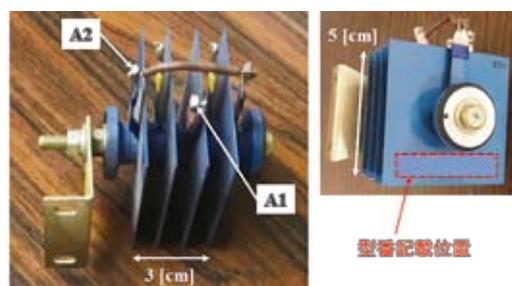


図2. セレン整流器標本体Aの俯瞰写真(型番:記載無し)

標本体Bは図3に示すように、銘板より型番「R67SC」を読み取ることが可能であり、これは冷却板の寸法からも照合できる。

表1. 電力用デバイスの研究開発と福井高専の沿革に関する年表

1900年〔明治33年〕	水銀整流器の発明 (C.Hewitt)
1920年〔大正9年〕	亜酸化銅整流器の発明 (米国特許出願)
1928年〔昭和3年〕	セレン整流器の特許出願 (日本特許第82596号, E.Presser)
1947年〔昭和22年〕	トランジスタの発明 (J.Bardeen, W.H.Brattain, W.B.Shockley Jr.)
1950年〔昭和25年〕	PiNダイオードの発明 (西澤潤一)
1957年〔昭和32年〕	サイリスタ(SCR)の量産化 (GE社)
1960年〔昭和35年〕	MOSFETの発明 (J.Attala, D.Kahng)
1961年〔昭和36年〕	高等専門学校制度の創設
1965年〔昭和40年〕	福井工業高等専門学校 電気工学科設置
1972年〔昭和47年〕	IGBTの発明 (特許公告昭47-21739, 山上倭三, 赤桐行昌)
1980年〔昭和55年〕	IGBTの基本構造提示 (H.W.Backe, C.F.Wheatly)
1982年〔昭和57年〕	IGBTの動作確認 (B.J.Baliga)
1984年〔昭和59年〕	Non-Latch-Up IGBTの発明 (日本特許第2644989号, 中川明夫)

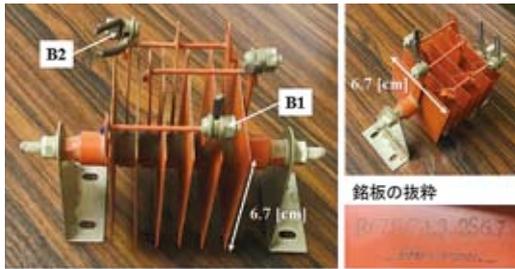


図3. セレン整流器標本体Bの俯瞰写真
(型番：R67SC 1.3. 2S6.7)

さらに標本体Cは図4に示すように、銘板の記載と冷却板の寸法より型番「R100SC」であることが確認された。

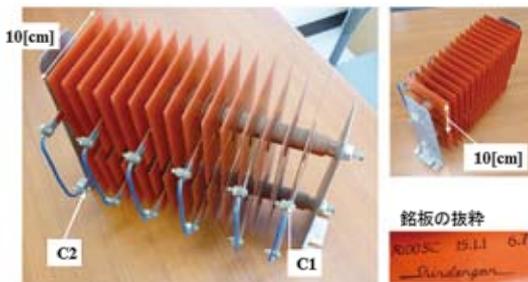


図4. セレン整流器標本体Cの俯瞰写真
(型番：R100SC 15.1.1 6.7)

標本体BとCに係る型番スペックの一覧を表2と3に示す。型番に記載された枝番号に対応する構造を確認するためには標本体を分解すべきではあるが、整流機能をはじめとする電気的特性がどの程度保存されているのかという観点から次章に述べる電気特性評価を優先することとした。

表2. スペック一覧 (標本体B, 型番：R67SC)

整流回路	単相			三相	
	半波	センターアップ (全波)	ブリッジ (全波)	半波	ブリッジ (全波)
アーム数	1	2	4	3	6
入力電圧 (実効値) [V]	20.0				
出力電圧 (平均値) [V]	8.5	8.0	16.0	12.5	25.0
出力電流 (平均値) [A]	2.70	5.40	5.40	7.60	7.60

表3. スペック一覧 (標本体C, 型番：R100SC)

整流回路	単相			三相	
	半波	センターアップ (全波)	ブリッジ (全波)	半波	ブリッジ (全波)
アーム数	1	2	4	3	6
入力電圧 (実効値) [V]	20.0				
出力電圧 (平均値) [V]	8.5	8.0	16.0	12.5	25.0
出力電流 (平均値) [A]	5.50	11.00	11.00	15.00	15.00

4. セレン整流器の電気特性評価

今回の調査として、セレン整流器の静特性 (I-V 特性) について順方向と逆方向の測定を試みる。測定器として岩崎通信機株式会社製の半導体カーブトレーサ (型名：CS-3300) を使用した。同装置の外観と主な測定仕様を図5に示す。同装置を用いる利点としてシングルモード (電力をマニュアル操作によって可変制御した試験パルスを通電することでデバイスの I-V 特性変化を探索でき、過大な電流を検知すると自動的に電力を抑制できる機能) によって探索的に標本体の電気特性に関する安定度を確認した後、スイープモード (シングルモードでの測定電圧から 0[V] に向かって、または 0[V] から同電圧に向かって一定の電圧間隔で I-V 特性を自動的に測定する機能) によって迅速に I-V 特性データを取得することが可能であることが挙げられる。



主な仕様)
 最大ピーク電圧：3.0 [kV] (高電圧モード)
 最大ピーク電流：1.0 [kA] (大電流モード)
 漏れ電流分解能：1 [pA] (LEAKAGEモード)

図5. 半導体カーブトレーサ (型名：CS-3300)

岩崎通信機HPより引用
http://www.iti.iwatsu.co.jp/ja/products/cs3000_accessory.html

標本体Aについて、図2中に示した引出電極位置「A1」と「A2」を各々カソード・アノードとして通電した結果を図6に示す。明瞭な整流特性が保持されていることを確認できた。順方向では150[mA]まで安定的に通電し、逆方向では-10[V]程度でやや不安定となる傾向が認められた。順方向特性から漸近線近似により立ち上り電圧 (V_{knee})

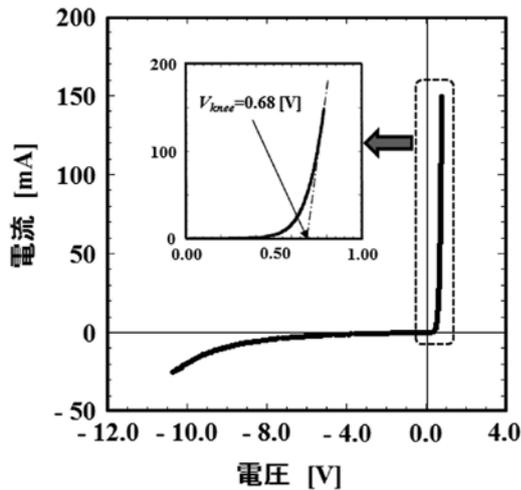


図6. セレン整流器（標本体A）のI-V特性

を求めたところ $V_{knee} = 0.68[V]$ の値を得た。

標本体Bについて図3中に示した引出電極位置「B1」と「B2」を各々カソード・アノードとして通電した結果を図7に示す。明瞭な整流特性が保持されていると共に $V_{knee} = 0.40[V]$ の値を得た。逆方向では標本体Aと同様に -10[V]程度でやや不安定となる傾向が認められた。

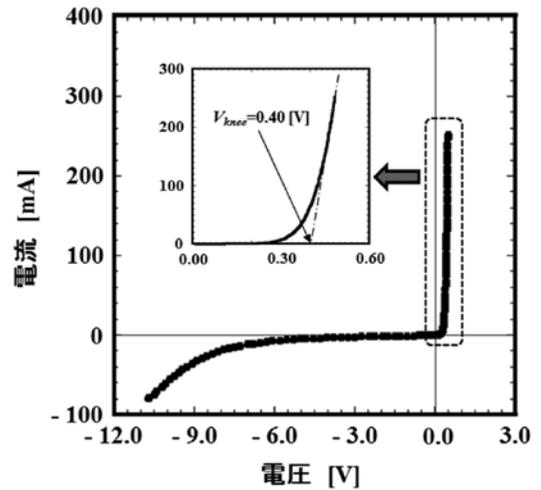


図7. セレン整流器（標本体B）のI-V特性

さらに標本体Cについて図4中に示した引出電極位置「C1」と「C2」を各々カソード・アノードとして通電した結果を図8に示す。明瞭な整流特性が保持されており $V_{knee} = 4.4[V]$ の値を得た。逆方向では-50[V]程度まで単調にリーク電流が増加するものの、降伏特性と思われる兆候は認められなかった。

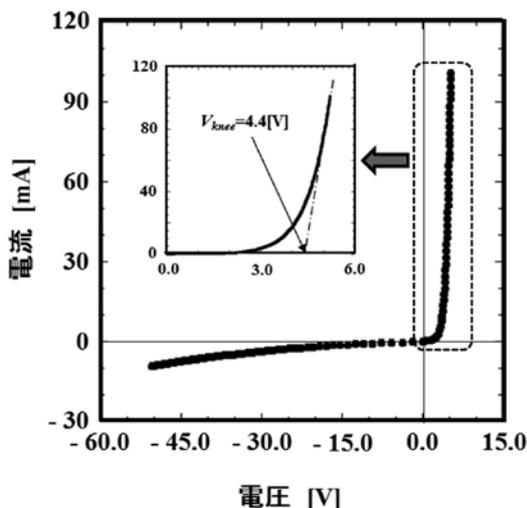


図8. セレン整流器（標本体C）のI-V特性

仕様規格情報（1968，新電元）²⁾よりセレン整流体の典型的な立ち上り電圧は0.4～0.6[V]であることから、標本体AとBの順方向特性はほぼ単体の整流体特性を反映したものであり標本体Cは複数の整流体が直並列に接続された状態にあることを反映したものではないかと推察される。今回の測定結果は定格電流の数%程度という限られた領域から得られたものではあるが、製造から半世紀以上を経過した状態であっても仕様規格に準じた特性を確認することができた。

5. 歴史的電気機器の高専教育での再活用

今回、3台のセレン整流器が福井高専の所蔵品としてその来歴を調査確認でき、予備的ではあるが電気特性についても知見が得られた。この成果を広く関係者に周知頂くと共に高専での教育的再活用を図るための手段として国立科学博物館・産業技術史資料情報センターが運営するデータベース（HITNET）への登録申請を検討した。現状で「セレン整流器」に関する登録情報を検索したところ1件が該当した。内容は1969年（昭和44年）に製造された無線装置（型名：

NET-125B25A) に実装されたセレン整流器ということであり電気通信大学 歴史資料館 (現 UEC コミュニケーションミュージアム) が所蔵している標本体であった。しかしながら登録に関する手続きの詳細を検討する段階で産業系博物館が標本体に関する情報を取り次ぐ必要があり、福井高専が直接申請する手続きは想定されていないことが判明した。登録に向けてどのような方策が可能であるか考慮中である。

今後、高専各校が所蔵する歴史的電気電子機器を用いて専門教育の場に於ける再活用を喚起するためには高専間の情報交換を密にする必要があると推察する。現在、高専機構としての博物館組織は存在しないものの独立行政法人化以前に設立された組織が今日に至るまで個々に運営されている。弓削商船高等専門学校の資料館と東京都立産業技術高等専門学校の科学技術展示館がそれである。前者は1971年(昭和46年)に設置され、航海実習で必要とされる船舶機器類をはじめとする展示物が一般にも公開されてきた歴史を有する。後者は東京都立航空工業高等専門学校(現東京都立産業技術高等専門学校・荒川キャンパス)に於いて1991年(平成3年)に竣工した歴史を有し、日本航空協会から「戦後航空再開時の国産航空機群」としての重要航空遺産認定を受けたコレクションを所蔵している。これらの先例に倣い専門諸学科が所蔵する歴史的機器類の情報を共有しその来歴を整理すると共に標本体又は映像による保存と展示を検討することで高専教育における「技術の変遷」についてより実地に即した教育効果が見込めるものと考えられる。

6. まとめ

福井高専に所蔵されている3台のセレン整流器について、その来歴と製造元に関する調査を行った。さらにI-V測定を試行した結果、製造後50余年を経過した時点でも整流特性が保存されていることを確認した。今後は標本体を一部分解して整流体の保存状態とセレン層の物理・化学状態に関する知見を得るためのより詳細な調査にも着手したい。

今回の活動を契機として歴史的電気電子機器類の高専教育における再活用という視点から具体的な取り組みについて議論が喚起されることを期待する次第である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、齋藤弘一氏(元福井高専 技術職員)よりセレン整流器標本体の保管状況及び来歴に関する情報を御提供頂きました。新電元工業株式会社 経営企画室各位にはセレン整流器に関する技術資料の御照会を頂きました。また、松本健児氏(岩崎通信機株式会社)には測定に関するアドバイスとご支援を頂きました。ここに紀要論文として刊行できたのは皆様の御支援あつてのことであり、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 政田辰三郎, 「技術解説 半導体整流器のABC」, 金属表面技術, Vol.13, No.5, pp.209-214, (1962).
- 2) 新電元工業株式会社, 「新電元ニュース(特集 セレン整流素子)」, Vol.7, No.7, (1968).
- 3) 秋山肇, 「九州帝国大学における水銀整流器の研究について」, 九州大学総合博物館研究報告, No.14, pp.59-64, (2016).
- 4) 福井工業高等専門学校50周年記念誌専門部会, 『福井工業高等専門学校50年史』, pp.42-43, (2016).
- 5) 藤崎春雄, 「特許に現れたるセレン整流器」, 電気學會雑誌, 64巻, 666号, pp.29-30, (1944).
- 6) 日本半導体歴史館, <http://www.shmj.or.jp/index.html>
- 7) 小谷鍊治編集, 「OHM文庫(84) 金属整流器とその応用」, オーム社, (1958).
- 8) 新電元工業株式会社, 「セレン整流器の歴史を語る」, 新電元工業株式会社, (1965).
- 9) 福井工業高等専門学校十年史編集委員会, 『福井工業高等専門学校十年史, 一開校10周年記念出版一』, pp.182-189, (1976).
- 10) 福井工業高等専門学校, 『福井高専5年の歩み』, pp.82-85, pp.229-230, (1976).
- 11) 新電元工業株式会社, 「新電元ニュース(特集 半導体素子)」, Vol.9, No.1, pp.31-46, (1970).

越前焼陶器の漬物容器としての活用

橋本 貴幸* 上島 晃智* 後反 克典* 山内 孝紀** 高山 勝己*¹

Use of Echizen ware as a pickle container

Takayuki HASHIMOTO, Akinori UEJIMA, Katsunori GOTAN,
Takanori YAMAUCHI and Katsumi TAKAYAMA

Echizen ware is one of Japan's Six Ancient Kilns. The clay of the Echizen area contains a lot of iron. Therefore, ferrous ion (Fe^{2+}) will be eluted from the surface of Echizen ware under acidic conditions. In this paper, time changes in the ferrous ion concentrations eluted from Echizen ware into a lactic acid solution were compared with those of plastic, enamel, glass, and ceramic vessels. After 10 days, 2-3.5 ppm ferrous ions were detected in the lactic acid solution. By using ICP-AES, it was confirmed that aluminum, calcium, and potassium were eluted into lactic acid solution from the Echizen ware at 15.3, 13.8, and 63.9 ppm, respectively. Eggplant was pickled in an Echizen ware with a commercial pickled element containing lactic acid bacteria. Eluted ferrous ion functioned to produce good color and prevent color fading of eggplant pickles.

Keywords : Echizen ware, Pickle container, Iron elution

1. はじめに

越前焼きは日本六古窯の一つであり昭和61年に伝統工芸品として指定された。越前焼きに用いられる陶土(丹生郡越前町)には鉄分が多く含まれ、焼き上がりの渋さの特徴となっている¹⁾。越前焼の用途としては観賞用から日用食器クラスまで様々なものが市販されているが、我々は越前焼陶器の漬物容器としての付加価値を見出すことに主眼を置いた。漬物発酵には多くの場合、乳酸菌が関与しており、発酵の進行過程において乳酸が生成するため漬物液は酸性(pH3~4程度)になる。漬物液が酸性化することで越前焼陶器内壁から鉄分の溶出が起これと考えられる。溶出する鉄は、それ自体がヒトへの鉄分補給となる上、漬物に対する発色や味覚に影響を及ぼすと考えられる。

本研究では、漬物発酵過程における越前焼陶器からの鉄の溶出挙動とその有効性について検討することを目的とした。

2. 実験

漬物容器として、越前焼壺Ⅰ(釉薬有、孔径小)、越前焼壺Ⅱ(釉薬無、孔径小)、Ⅲ(釉薬無、孔径大)、ガラス容器、ポリプロピレン(PP)容器、ホーロー容器、常滑焼壺の7種類の容器を選択した。越前焼壺の写真を図1に示した。



図1 越前焼壺Ⅰ(左)、越前焼壺Ⅱ(右)の内面写真

2・1 SEM測定

越前焼壺Ⅰと越前焼壺Ⅱを適当な大きさに割碎し、破片の内部表面をSEM(JSM-7001FTTLS型,日本電子製)で観察した。

2・2 各容器からの鉄 (Fe^{2+}) 溶出試験

水または1wt%乳酸水溶液(pH3.3)を越前焼壺I, II, III, ガラス容器, PP容器, ホーロー容器, 常滑焼壺に100mlずつ注入し, 30日間にわたって各容器の乳酸水溶液中に溶出してくる2価鉄 (Fe^{2+}) 濃度をバソフェナントロリン法によりモニターした. コントロールとして水を注入した場合についても同様に行った.

2・3 ICP-AESによる越前焼壺から乳酸水溶液中に溶出する金属元素の定量

越前焼壺Iに1wt%乳酸水溶液を200ml入れ, 10日経過後にICP-AES (Optima8300, パーキンエルマー社製)を用いて溶液中に含まれる15種類元素 (Al, Na, K, Ca, Fe, Mg, Cr, Mn, Ni, Sr, Y, Ba, Se, Cu, Zn) を定量した.

2・4 ナス浅漬け試験

越前焼壺I, II, III, PP容器, ガラス容器, ホーロー容器, 常滑焼壺に, 適量の輪切りにしたナスと浅漬けの素 (コミローナ, 株式会社コーセーフーズ) を入れ, 翌日以降のナスの色調を目視で観察した.

3. 結果と考察

3・1 SEMによる越前焼陶器の内壁表面観察

図2に越前焼壺Iと越前焼壺II内面のSEM表面観察像を示した. 越前焼壺Iは釉薬により穴が覆われふさがれて滑らかになっていることがわかった. 一方, 越前焼壺IIの内表面は粒状構造を維持していることがわかった.

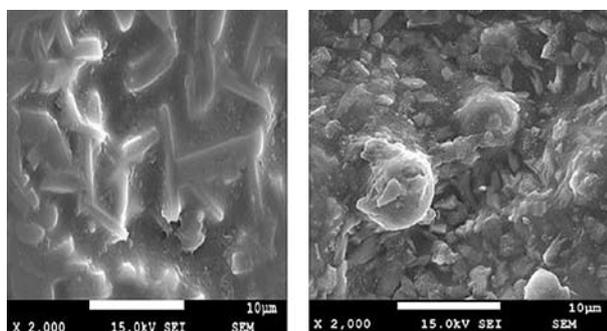


図2 越前焼壺の内表面 SEM 画像
越前焼壺I (左), 越前焼壺II (右)

3・2 各容器から乳酸水溶液中への二価鉄溶出実験

越前焼壺I, 越前焼壺II, 越前焼壺III, PP容器, ガラス容器, ホーロー容器, 常滑焼壺に1wt%乳酸水溶液100mlを注ぎ, 0, 1, 2, 3, 8, 30日目ごとにそれぞれの容器から4mlサンプリングし, バソフェナントロリン試薬 (共立理科試薬キット) を各1本加え30分間室温で放置後, 534nmの吸光度を測定した. 各容器に入れた乳酸水溶液中に含まれる Fe^{2+} 濃度の経日変化を図3に示した. 越前焼壺I, II, IIIはほかの材質の容器に比べ, 2~3.5ppmの Fe^{2+} が顕著に溶出しており, 特に釉薬の壺Iは釉薬からの溶出も加わるため溶出量が高くなるものと考えられる. なおIIとIIIを比較した結果, 孔径は溶出量にはあまり影響しなかった. ここで水を溶媒とした場合は, Fe^{2+} の溶出はいずれの容器からも検出されなかった.

同じ容器を用いて2回目以降の溶出実験を行った (ただし, モニタリングの期間は10日までとした) と, 1回目と同じ溶出傾向であり, Fe^{2+} の溶出は10日経過まで直線的であり, 2~3週間の間で飽和値に達した. しかし, 2回目以降の溶出試験では, 1回目 비해 Fe^{2+} の溶出量が暫時減少した (越前焼壺Iは, 飽和溶出値 = 1.7ppm).

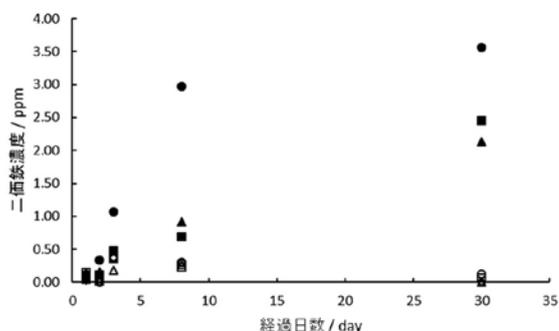


図3 各種容器からの乳酸水溶液への Fe^{2+} 溶出の経日変化 (一回目実験結果)

●:越前焼壺I, ■:越前焼壺II, ▲:越前焼壺III, ○:ホーロー, □:常滑焼壺, △:PP容器, ◇:ガラス容器

3・3 ICP-AES分析による乳酸水溶液への越前焼壺からの元素成分の溶出

越前焼壺Iに1wt%乳酸水溶液を200ml注入して, 10日間室温で放置した. サンプル原液を希釈せずに, そのままICP-AES測定を行った. その結果, Fe, Na, Al, K, Caがそれぞれ3.8, 0.9, 15.3, 63.9, 13.8ppm検出された (Mg, Cr, Mn, Ni, Sr, Y, Ba, Se, Cu, Znは検出限界以下であつ

た)。検出されたこれらの5元素は、表1に示した地殻に含まれる主要元素の組成²⁾とほぼ一致し、陶器の材料である粘土成分由来であることを示唆している(本実験ではSiは測定していない)。本実験における乳酸水溶液(pH3.3)の酸化還元電位は約400mVであったことから、鉄は主に Fe^{2+} として溶出する³⁾。

表1 地殻の元素組成 (%)

酸素	46.6
ケイ素	27.7
アルミニウム	8.1
鉄	5.0
カルシウム	3.6
ナトリウム	2.8
カリウム	2.6
マグネシウム	2.1
その他	1.4

3・4 越前焼壺を用いることによるナスの浅漬け色落ち防止効果

各容器に、輪切りにしたナスを入れ、市販の浅漬けの素を用いて漬け込んだ。貯蔵庫(4℃)で翌日以降のナスの色合いを目視で観察したところ、図4の写真のように越前焼壺Iを用いて漬けた方が、ナスの色彩が鮮やかであり、色持ちもよくなると判断した。



図4 ナスの浅漬け(数日後)
越前焼壺I(つやがある) その他の容器(くすみがある)

4. 結論

越前焼陶器を用いて漬物を作成した場合、乳酸の生成に伴う酸性化により、陶器からアルミニウムや鉄分が溶出し、これが漬物の色落ちに対する防止策(ナスの皮に含まれているデルフィジン(ナスニン)との錯体形成によるもの)として機能するのではないかと考えている。これは一般的にナス漬けを作るときにミョウバンを添加すること

と同じ効果であるといえる。

なお溶出するアルミニウムの濃度は健康を害するレベル(アルミニウム摂取基準: $2mg \cdot kg \text{ weight}^{-1} \cdot \text{week}^{-1}$ ⁴⁾)と比較すると、この漬物液を一時期に大量に飲用しない限りは問題にならないレベルといえる。

一方、鉄に関しては、男女年齢別に定められている1日摂取必要量⁵⁾を補給する手段としては、越前焼壺からの溶出量が微量であるため(7日経過後の漬物液に Fe^{2+} は3ppm程度となる)、この漬物液を鉄のサプリメント飲料水として用いるには、毎日1~2リットルを飲用せねばならないことになり現実的といえない。

5. 今後の展望

越前焼は焼成条件を変化させることで細孔の大きさを変える事が可能である。孔径は容器の通気性に大きく寄与(越前焼はまさに呼吸する容器ともいえる)し、微生物の増殖に影響(容器の壁を通しての酸素供給)すると考えられる。さらに鉄は重要な微生物の生育因子の一つでもある。

このような理由から、越前焼壺を発酵食品製造容器として応用する事も興味がある。一方で Fe^{2+} は殺菌作用⁶⁾もあることから食品保存用容器としての可能性も考えられる。

参考文献

- [1] 越前焼工業協同組合、「越前焼とは」、<http://www.echizenyaki.com/about/>
- [2] J. E. Andrews, P. Brimblecombe, T. D. Jickells, P. S. Liss and B. J. Reid 共著, 渡辺正訳『地球環境化学入門』改訂版2008, スプリンガー・ジャパン, p.6.
- [3] 岩倉千秋, 森田昌行, 井上博史, コンパクト電気化学, 丸善出版, 2019, p.178.
- [4] 厚生労働省, 「アルミニウムに関する情報」, https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryoku/shokuhin/syokuten/aluminium/index.html
- [5] 厚生労働省, 「日本人の食事摂取基準」(2010年版), <https://www.mhlw.go.jp/shingi/2009/05/dl/s0529-4ah.pdf>
- [6] A. Murata, T. Hidaka, K. Kanda and F. Kato, *Bull. Fac. Agr., Saga Univ.*, 93, 141-155 (2008).

ウリカーゼ固定化尿酸バイオセンサの開発

山田 美空* 坂元 知里*¹

Electrochemical evaluation of uricase immobilized biosensor

Miku YAMADA and Chisato SAKAMOTO

Hyperuricemia, which induces gout or renal injury, is getting young in recent years. Hyperuricemia requires control of lifestyle, and uric acid levels in blood is the subject of measurement. Currently, uric acid levels are measured at medical institutions. In order to control the uric acid levels by lifestyle habits, a high-throughput measurement method at home is necessary. In this research, we aim to develop a high-throughput biosensor of measuring uric acid value selectively with high sensitivity using electrochemical measurement. The uric acid biosensor specifically detects uric acid by immobilizing uricase which is uric acid-decomposing enzyme on the electrode. Furthermore, selective measurement is possible, including measurement of contaminants, and confirmation.

Keywords : Biosensor, Uric acid, Uricase, Enzyme immobilization, Electrochemistry

1. はじめに

痛風などを引き起こす高尿酸血症は、発症年齢が若年化されており、生活習慣と深く関わった疾病である。1日に体内で生産される尿酸は約700mgであり、また1日に排出される量も700mgであるため体内の尿酸は常に一定の量に保たれている。体内での尿酸の収支が合わず尿酸が溜まり、血中の尿酸値が溶解限界濃度である7.0mg/dLを超えることで、高尿酸血症を発症する¹⁾。

現在の尿酸値の測定は、尿酸の還元性を利用した還元法、尿酸分解酵素（以下、ウリカーゼ）を用いた酵素法などがあり、医療機関にて測定を行う。しかしながら前述にもあるように、痛風は生活習慣と深く関わっているため、家庭で容易に測定可能なデバイスが必要であると考えた。

本研究では尿酸値を測定する手法として、電気化学的測定法^{2), 3)}に着目した。血中の尿酸を電気化学的に測定する場合、血中にはタンパク質やアスコルビン酸などの夾雑物質が含まれており、尿酸測定の阻害物質となる。よって本研究では、選択的に尿酸を定量する為、酵素の基質特異性に着目し、ウ

リカーゼを用いることとし、ウリカーゼと尿酸の酵素-基質反応により生じる電子を測定することとした。さらに、酵素-基質反応により生じる電子は微量であるため、高効率に電子を集電するため、ウリカーゼを電極上に固定化するウリカーゼ固定化尿酸バイオセンサの開発を目的とした。

2. 実験方法

2・1 ウリカーゼ固定化PFC電極の作成

図1にウリカーゼ固定化尿酸バイオセンサの概要を示す。ウリカーゼ固定化尿酸バイオセンサは、炭素電極であるPlastic Formed Carbon電極（BAS社；以下、PFC電極）にウリカーゼを化学的架橋である酵素無配向固定法^{3), 4)}により固定化した。

PFC電極を研磨し、50mM硫酸で洗浄した。次に5wt%ニクロム酸カリウム in 10wt%硝酸に浸漬し、10秒間、1.2V (CA)の電位印加を行い、電極表面にカルボキシル基を導入した。その後、PFC電極を200mMカルボジイミド (WSC)、50mM N-ヒドロキシエステル (NHS) in 100

mM MES 緩衝液 (pH4.7) に1時間浸漬し、イオン交換水で洗浄することでカルボキシル基を活性化させた。その後、10mg/ml ウリカーゼ溶液に3時間浸漬する事で、PFC 電極にウリカーゼを固定化させた。

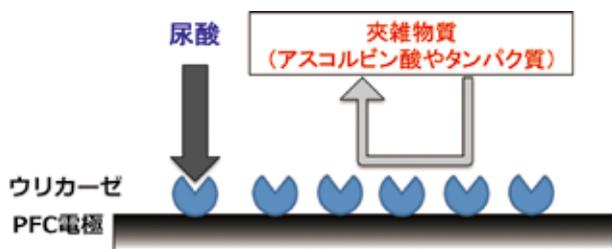


図1 ウリカーゼ固定化尿酸バイオセンサのデザイン

2・2 尿酸測定

2・2・1 尿酸測定条件

尿酸測定は、クロノアンペロメトリー法(以下、CA)により行った。CAは、三電極系であり、作用電極にウリカーゼ固定化PFC電極、対極にコイル状にした白金電極、参照電極に銀塩化銀電極を用いた。

測定溶液には、メディエーターである2mM フェリシアン化カリウムと1mM EDTA in 50mM ホウ酸塩緩衝液(pH8.4)を用いた。測定電位は、CV法により酸化電位0.19Vを決定し、印加した。測定対象である尿酸を1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0, 12.0, 15.0mg/dl となるよう添加した時の電流値を測定した。

2・2・2 アスコルビン酸含有尿酸測定条件

夾雑物質が与える尿酸測定に対する影響を確認するため、血中に多く含まれ、かつ尿酸と酸化電位が近いアスコルビン酸を夾雑物質として選択した。

測定溶液に7mg/dl アスコルビン酸と7mg/dl 尿酸を添加した時の電流値測定を測定した。

3. 結果と考察

3・1 尿酸濃度に対するCA測定

図2に1.0～15.0mg/dl 尿酸を添加した時のCA結果を示す。尿酸濃度が1.0mg/dl から高尿酸血症の判断値である7.0mg/dl の範囲で直線性があり、尿酸濃度に依存した検量線を求めることができた。決定係数 $R^2=0.996$ となった。一方7.0mg/dl 以上の濃度範囲においては、尿酸濃度に対する検量線の決定係数が $R^2=0.985$ となり、低濃度側

と比較すると検量点の分散が高いことがわかった。尿酸は、水に対する溶解度が低く、尿酸濃度が7.0mg/dl 以上となると、(目視では確認できないが)溶解せずに結晶化した尿酸が含まれるためではないかと考える。本方法では、尿酸濃度が低濃度側の信頼値が高く、尿酸バイオセンサとして有効であると考えた。

3・2 アスコルビン酸含有尿酸溶液に対するCA測定

アスコルビン酸は、尿酸と近い電位で酸化することが知られているため、尿酸を測定するにあたり、夾雑物質として対象測定物になることが多い。図3に①7.0mg/dl 尿酸のみ、②7.0mg/dl アスコルビン酸と7.0mg/dl 尿酸、③7.0mg/dl アスコルビン酸のみを添加した時のCA結果を示す。

夾雑物質であるアスコルビン酸のみを添加した場合(条件③)と他条件の尿酸を添加した場合(条件①や②)を比較すると、アスコルビン酸のみの電流値が1/6となった。この結果からCAで得られた電流値は、固定化したウリカーゼと尿酸の”酵素-基質反応により生じた電子”により得られた電流値であると考えられ、ウリカーゼを用いることで尿酸を選択的に測定することが可能であると示された。

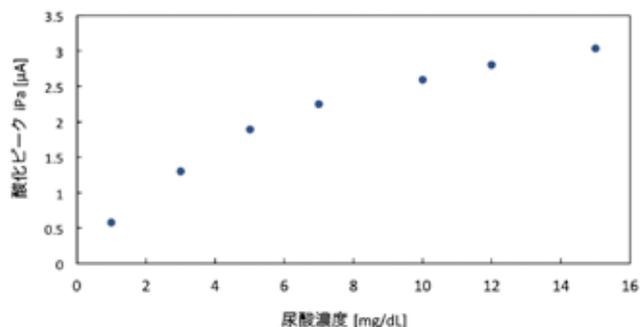


図2 尿酸濃度に対するCA結果

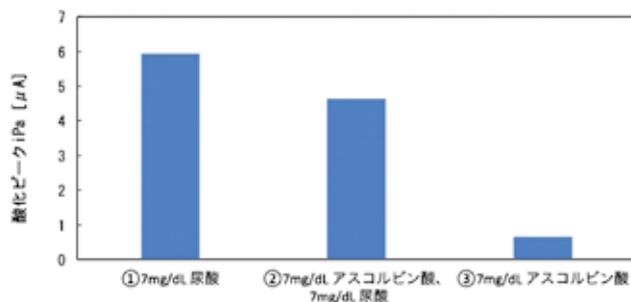


図3 アスコルビン酸有無の電流応答量比較結果

一方、尿酸のみを添加した場合（条件①）とアスコルビン酸も添加した場合（条件②）を比較すると、アスコルビン酸を添加した場合（条件②）は、尿酸のみの場合（条件①）より電流値が減少した。これは、電極表面付近にアスコルビン酸が存在するため、酵素-基質反応により生じた電子が電極に移動する電子移動効率が阻害されたためではないかと考察する。よって今後は、電極表面付近への夾雑物質の移動を防ぐ機能を付与する必要があると考える。

4. まとめ

本研究では、生活習慣が最も起因している疾患である高尿酸血症を予防するため、生活に密着したデバイスシステムの開発を目指し、容易かつ選択的に尿酸を測定することが可能なウリカーゼ固定化尿酸バイオセンサの構築を目指した。ウリカーゼ固定化 PFC 電極を用いて、尿酸値の計測を行ったところ、高尿酸血症の基準値である 7mg/dl 付近で尿酸濃度に依存した電流値を得ることができた。

さらに、血中に多く含まれる計測阻害となる夾雑物質としてアスコルビン酸を添加し、同様に計測を行ったところ、アスコルビン酸の有無により電流値の差異を確認した。よってウリカーゼ固定化 PFC 電極では、ウリカーゼと尿酸の酵素反応により生じた電子を計測したと考察する。しかしながら、アスコルビン酸を添加した場合、電流値の減少を確認し、夾雑物質による尿酸の計測阻害があると考察した。今後、さらなる選択性の向上および計測阻害の減少させる機能を付与させたバイオセンサを構築することで、生活環境で誰でも容易に使用できるデバイスを開発することができ、痛風患者の減少に貢献できると考える。

参考文献

- 1) A. Dehghan, A. Hofman, et. al., *Cardiovascular and Metabolic Risk*, **31**, 361-362 (2008)
- 2) H. Sakamoto, R.Hatsuda et. al., *Analytical Sciences*, **27**,333-335 (2011)
- 3) Y. Zahang, W. Shen, et. al., *Analytica Chimica Acta*, **369**, 123-128 (1998)
- 4) 千畑一郎 講談社サイエンティフィック 固定化酵素

降雪時の水源井戸の揚水能力低下の検証

奥村 充司*

Verification on reduction of pumping capacity of well for waterworks during snowfall

Mitsushi OKUMURA

In the waterworks which makes the groundwater a main water intake source, continuation possibility of the management of waterworks is ruled by deliberate implementation of upkeeping in superannuated facilities. Large-scale watering restriction caused by snow melting use of groundwater was put into effect in Katsuyama City, Fukui prefecture from January to February in 2018. This phenomenon was analyzed using the measured data which is about pumping time and well water to offer the information to take the measures. The physical degradation estimated formula by which we assumed that progress of degradation of well equipment for tap water sources was based on an exponentiation in time is supposed. April, 2008 was done with an early stage and the degradation probability model who reflected the driving which exceeded appropriate yield at the time of a snowfall was proposed.

Keywords : deterioration rate , well , water source , weibull distribution

1. はじめに

2018年1月に福井豪雪に伴う融雪用水としての水道水需要増に加えて低温により各地で給水管が破損し漏水が発生し、さらに市内の地下水面低下が拍車をかけた。このため、勝山市上水道の片瀬配水区および平泉寺配水区内で給水制限が実施された。勝山市建設部上下水道課は地下水利用実態と井戸設備の現況調査および揚水試験を実施し、同市水道水源保護審議会において、原因究明と対策を審議した。市内の融雪のための地下水利用状況は2006年(平成18年)豪雪以降、各戸対策として融雪用自家用井戸の掘削が漸増し、累計で数千件におよぶと試算した。このため、市内の不圧帯水層における地下水位の低下が冬季に発生すること、また、既設の水源井戸の井戸枠スリットの目詰まりなど洗浄対策が必要な状況下で限界揚水量までの取水(高負荷率運転)を継続したことから、劣化メカニズムが著しく進展したこと、また、各水源井戸の距離が近く影響円の範囲にあるため、その洗浄が困難であることから今後慢性的な配水池への送水量不足が継続することが懸念されることも明白になった。以上のことから、その対応として、降雪時の地下水および水道の融雪利用を制限する条例づくりおよび老朽化した井戸施設の更新の2つを主たる課題とした¹⁾。

2. 勝山市の立川水源井戸群のカメラ調査

勝山市の水源井戸の劣化状況を把握するために、平成30年度に水源井戸のカメラ調査を実施した¹⁾。その結果を写真-1、表-1に示す。立川3号井について、その揚水能力は最も低下傾向にあり、写真-1に見られるように井戸枠の目詰まりを解消するための対策を必要とする。しかし、その近くに1、2号井があるため井戸枠の洗浄作業が困難であることが指摘されている。3号井の最大取水可能量は設置当初2016 [m³/day]であったが、現状は1440 [m³/day]であること、また今後洗浄作業が困難なことから、現状の70%である1008 [m³/day]が現状および今後の適正取水可能量となる。

これらの井戸群の取水能力は設置当初の7344 [m³/day]

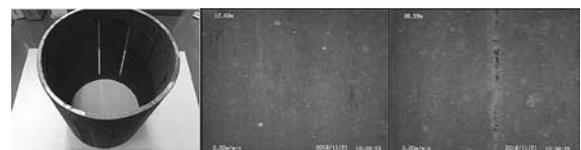


写真-1 立川3号井のカメラ調査¹⁾
左：井戸枠 中：スクリーン部正常
右：スクリーン部スケール付着により閉塞

表-1 適正取水可能量算定のための既設水源井戸群の調査結果¹⁾

立川 水源 号井	構造	設置 年度	経過 年数	当初許可 取水能力 [m ³ /day]	調査結果の 最大取水 可能量 [m ³ /day]	調査結果の 洗浄後最大 取水可能量 [m ³ /day]	適正取水 可能量 [m ³ /day]	調査結果		総合 判定	
								取水 能力	洗浄 可否		
第1	1	φ 4000 × 6.41m	1959	59	2448	1440	1440	1008	×	×	×
	2	φ 300 × 23.6m	1967	51	1152	1370	1370	963	○	×	△
	3	φ 350 × 47 m φ 300 × 30.2 ~ 47m	1976	42	2016	1440	1440	1008	×	×	×
第2	4	φ 400 × 30m	1969	49	864	500	864	605	×	○	△
	5	φ 350 × 55m	1969	49	864	720	720	504	△	×	×
				小計	7344	5470	5834	4088			

から 5834 [m³/day] と約 80% に低下している。なお、水道施設設計指針 (日本水道協会) によれば、段階揚水試験で、これ以上揚水量を増やすと急激に水位が低下し、井戸に障害を起こす量を限界揚水量とし、限界揚水量の 70% 以下の揚水量を適正揚水量としている。また、工業用水道施設設計指針・解説 (社団法人日本工業用水協会) では、段階揚水試験によって求められた限界揚水量の 80% を適正な揚水量の目安としている。一方、簡易水道施設基準解説 (全国簡易水道協議会) では、地下水を取水する場合、計画取水量がいつでも十分取水可能であるように、適正揚水量は、渇水期における限界揚水量の 50% を標準としている²⁾。しかし、実際はここ数年の冬季の融雪需要に対応するため、その最大取水可能量近くまで揚水を実施してきた経緯もあり、取水量はすでに限界状態である。

3. 重回帰分析による揚水量係数 K^* の推定

不圧地下水の定常揚水量算出式に Thiem の式⁶⁾を採用し、次式に示す揚水量係数 K^* を定義した。

$$K^* = \frac{\pi k}{2.3 \times \log(R/r)} = \frac{Q}{H^2 - h^2} \quad (1)$$

ここで、 K^* : 揚水量係数 [m/day], k : 透水係数 [m/day], R : 影響円半径 [m], r : 井戸の口径 [m], Q : 揚水量 [m³/month], h : 井戸水深 ($H-s$), s : 揚水時の水位低下量 [m] である。

3・1 揚水量係数 K^* の時刻 t の 1 次近似式

2008 年 4 月を時刻 $t = 0$ [month] として K^* をプロットしたものが図-1 である。2008 年 4 月を $t = 0$ [month]

としており、2019 年 6 月が $t = 122$ [month] となる。ただし、この図において 2014 年 11 月～2016 年 6 月の期間は洗浄等の設備の保守作業等が行われなかったにも関わらず K^* の値は上昇していた。市に確認したところ、揚水時の水位低下量を正確に計測されていなかった可能性があり、この期間のデータを分析対象から削除することとした。この図から K^* の値は時間経過とともに減少していくことが明らかとなった。ここでは、時間 t の 1 次関数として回帰式および相関係数を表示した。

3・2 立川水源群から片瀬配水池への配水量予測

つぎに、立川水源井戸群 (立川 1 号井～3 号井および立川 4, 5 号井) の各ポンプ運転時間を用いて片瀬配水池への送水流量を算定する。送水量は各井の揚水量に運転時間を掛けて合計した数量によって算定される。ただし、各井の揚水量は限界揚水能力からある程度余裕を持って運転される。ここで、冬期の水不足時にはポンプの運転は限界揚水量で運転されていると考えられる。この状態での長期運転は井戸の各設備の時間劣化を進展させる。指標として今回調査時の最大揚水能力に運転時間を乗じて合計したものを 1 日当たりに換算した値と実送水量との相関関係をみた。図-2 によれば、2016 年以降の揚水量が全期間のデータを用いた推定値が実測値を上回っており過大評価されていることがわかる。すなわち、最大取水可能量が低下していることが明らかとなった。

3・3 ワイブル分布を用いた劣化速度式の加齢時間の近似

式 (1) で定義した透水量係数 K^* の値が時間の経過とともに減少していくことが確認された。劣化のメカニズム

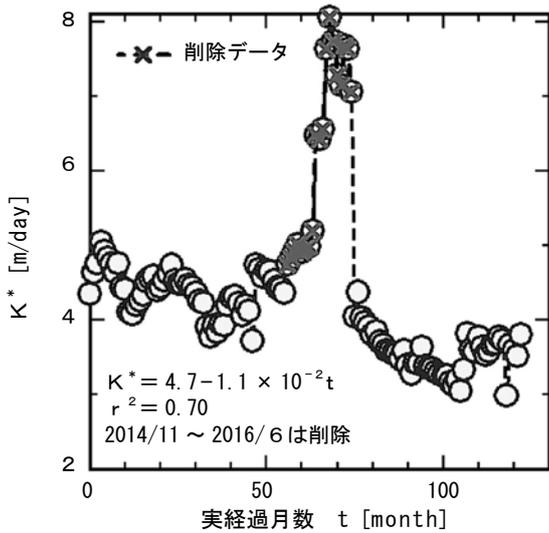


図-1 揚水量係数 K^* の時間変化

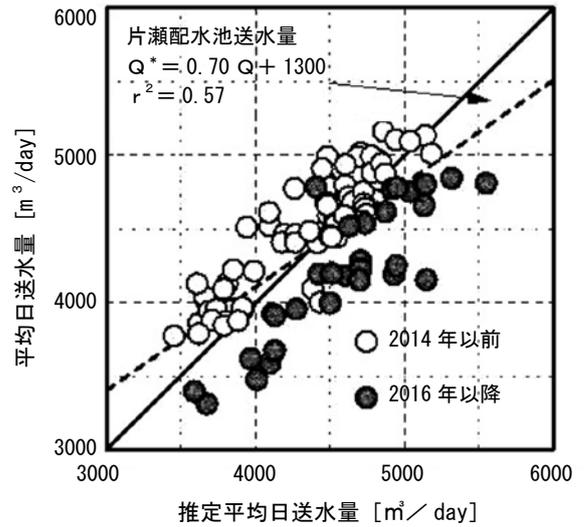


図-2 片瀬配水池送水量の実測値と予測値の比較

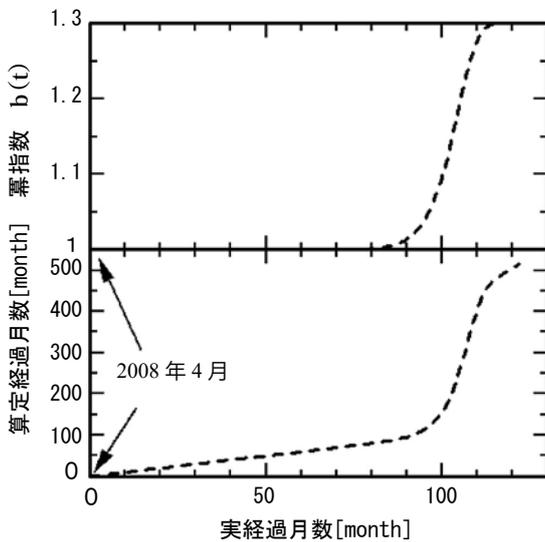


図-3 算定経過月数

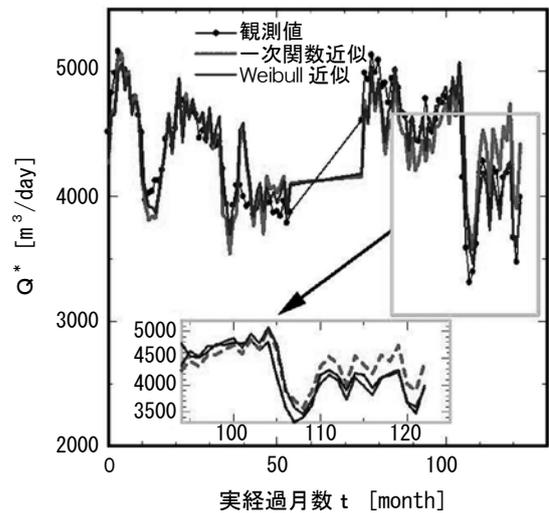


図-4 算定片瀬配水池送水量の経過

には井戸スクリーンの開孔率推定による評価手法があり、定期的にメンテナンスする必要性が指摘されている。⁴⁾ この現象を劣化速度式により推定する場合、ワイブル分布確率を用いて論じられることがある⁵⁾。そこで、 K^* の値を次式のように時間の関数として定義する。

$$K^* = K_0^* \times h_3 \times (t_0^*)^b$$

ここで、 K_0^* :比揚水量係数、 h_3 :立川水源3号井水位、 t_0^* :実経過月数 [month]、 $b = b(t)$:時間依存冪指数 (1.0 ~ 1.3)

K^* を従属変数とし、 h_3 、 t_0 を説明変数として、それぞれ対数値を用いて重回帰分析し以下の結果を得た。

$$K^* = 14.4 \times h_3^{-0.481} \times t_0^b$$

$$b = 1.0 + 0.3 \times F(t)$$

ただし、 $F(t) : \text{Weibull}(t, a, b)$ [$a = 105, b = 20$]

図-3は仮想時刻の算定に用いる冪指数の経過時間による変化をワイブル分布で示したものである。また、1次関数近似、ワイブル分布のそれぞれについて、実経過月数を横軸にプロットしたものを図-4に示す。これにより、図-2での2016年以降の実送水量とのずれを修正することができた。ずれの要因が限界揚水量近くでの運転継続により K^* の値が実際より大きく減少していることが示された。 K^* の値は透水係数 k および影響半径 R の関数であり、それらの変動を包括した指標と考えられる。限定された情報からはこれ以上の詳細な検討はできないが、おそらく隣接井戸の影響を互いに少なからず受けていると判断できる。したがって、少なくとも立川3号井の設備更新、具体

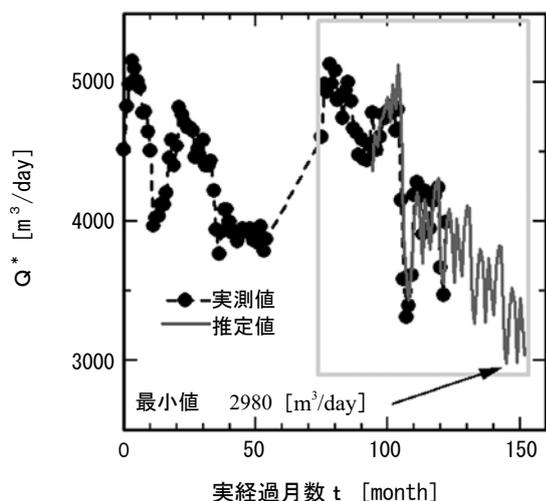


図-5 若猪野配水池送水量の予測

的には井戸枠スリットの洗浄、ポンプ交換等のメンテナンスが必要である。これは、故障率の経年変化を示すバスタブカーブにおいて偶発故障期間から摩耗故障期間へ移行したと判断される。しかし、表-1に示すように、その作業実施は物理的に困難であり、井戸の新設さらには地表水など他の水源の確保が必要な状況である。勝山市はこれまで簡易水道の施設統合を進めており、その水源水利権保持のため浄土寺川ダムの管理負担金、水源負担金を拠出してきた。しかし、浄水場建設には2009年当時の試算でも約10億円を要することから現状は地下水を水源として利用し続けるための方策を検討することが肝要である。

図-5に示すように老朽化が進展すれば、降雪時において約1000 [m³/day] の浄水が不足する事態となる。

4. 立川水源井戸群の更新および新設の必要性

井戸群の設備更新が困難な状況を鑑みれば、今後再び2018年1月～2月の規模の豪雪災害に見舞われた場合、地下水面が低下した状況で水道水の融雪需要が増加すれば設備の経年劣化が促進され、片瀬配水池への送水量は減少するリスクが高まることが明らかとなった。

新設を行わないとすれば、現有施設・設備でこの水量を通常の余剰水量として確保する必要がある。そのために民間の融雪利用による地下水位低下を防ぎ、さらに水道の融雪使用の自粛を呼びかける必要がある。しかし、住民のモラルのみに頼っているはその効果は低いことが昨年冬季の節水広報に対する反応により実証されている。今後は既存の水道水源保護条例に地下水利用の規制条項を盛り込んでいく必要がある。ただし、取水制限を受ける地区と水

源井戸のある地区とは上下流問題も潜在しているので、規制地区の設定や法的拘束力を盛り込む内容にするか否かについて、とくに慎重を期する必要がある。

5. おわりに

本論文では2018年1月から2月にかけて発生した勝山市の給水制限の原因を究明し、対策を講じるための情報を提供すべく揚水時間および井戸水位の実測データを用いて、この事象を解析した。すなわち、水道水源用井戸設備の劣化の進行が時間のべき乗に従うとした物理劣化予測式を仮定し、2008年4月時点を初期条件とし、降雪時の適正揚水量を超過し運転を継続した事象を反映した劣化確率モデルを提案し、コストが最小となる最適な点検・補修時期を導出する手法の検討の手助けとする。この方法は、確率モデルの導出と選択、複数の劣化機構を統括する確率モデルの提案、コスト期待値の最小化から構成されている。この手法は、地中に埋設されたパイプライン設備のように、点検に相当の時間とコストを必要とし、点検データの蓄積が少なく、劣化が潜在的に進行する場合に、既往の物理劣化予測式を活用できるようにした点に特徴がある。これらの手法を地中に埋設された井戸枠スリットの発錆およびスケールによる目詰まりおよびポンプの揚水能力低下等による揚水能力低下に着目し、実水位および揚水量データを用いて推定値の検証を行った。

謝辞：本研究を進めるにあたり勝山市建設部上下水道課には快く地下水データをご提供頂きここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 勝山市建設部上下水道課, 第3回勝山市水道水源保護審議会資料, 2019.1.
- 2) 水道技術ジャーナル, 水道技術研究センター, 2013.4.
- 3) 藤倉規雄・吉野隆・水谷隆夫・前田哲史: 劣化メカニズムを考慮した確率モデルによる最適な点検・補修時期の決定, 土木学会論文集 D, Vol.66, No.1, 1-13, 2010.1.
- 4) 市川勉ら, 井戸スクリーンの開孔率推定による井戸老化の評価, 地下水学会誌, 第36巻第1号, pp45-53, 1994.1
- 5) 堀籠教夫, ワイブル分布の特性とその形状パラメータについて, 日本船舶機関学会誌, 第15巻, 第6号, pp27-33, 1970.6.
- 6) 公益社団法人 地盤工学会, Thiemの定常井戸理論, 地下水調査に用いる井戸理論式の整理及び解説 (2017年度版)

鯖江断層北部と福井平野 — 鯖江断層南部との関連 —

岡本 拓夫*

Northern Part of the Sabae Fault and the Fukui Plain — Induction from southern part of the Sabae Fault —

Takuo OKAMOTO

The Sabae-Takefu area (Seibu Bonch) has experienced no earthquake. However, an active fault, named the Sabae fault, exists in the middle part of that area. We recognize the clear dislocation between mountain and plain. We will study the structure under that area by using the gravitational data and the wave-form recorded temporal station at the high school and the new station at the elementary school. From the topography of southern part of the Sabae area and wave-form analysis, we concluded that this dislocation was caused by the active fault.

Keywords: Seismicity, Active fault, Edge effect, Earthquake fault, Fukui Earthquake

1. はじめに

福井平野西縁部の地形学的、地震学的特徴と重力データの解析結果の紹介を、報告書(岡本, 2018)¹⁾で詳細に行った。考察の中でも十分に議論できなかつたのが、足羽山を含む地域での断層構造の推定である。その地域は、三川が合流し、厚い沖積平野をなし、しかも足羽山が存在している。付近北側では、藤島高校の Super Science High School (SSH) のプログラムでの地震観測による解析(岡本の指導)が継続的になされ、結果が日本地球惑星科学連合の連合大会高校生部門で継続的に発表されている。特に注視される結果としては、観測波形の精査と福井地震の被害により西縁部にも強震動帯の存在が指摘されていることである(岡本, 2016)²⁾。これらは、西縁部にも断層構造が存在し、南部に存在する鯖江断層と関連する可能性も考えられることを示している。岡本(2017)³⁾は、河合小学校で、高感度地震観測を開始することが可能であると結論し、観測を開始した結果、西縁部が断層構造でなければ発現されることのない後続波が観測されることを示した。その後の藤島高校の研究によって、断層のエッジ効果に

よる波形の可能性が高いことが指摘された。さらに、重力の研究(野口他, 2011)⁴⁾において、同地域に基盤構造の深い落ち込みが指摘されており、また、断層構造の存在を支持する結果となっている。鯖江断層南部の詳細は、武生高校の SSH で詳細な研究がなされ報告されており、南限が地震活動の空白域のエッジと一致する事が報告されている。一連の考察の中で懸念される鯖江断層との接続問題が、現在、曖昧のままに残っている。足羽山付近を断層線がどのように接続していくかは、当該断層の活動だけではなく地震動の増幅にも関与する事となり、当地域の地震防災を考察する上で重要なファクターになる。まだ明らかにされていない断層構造を見いだすことは、地域防災の上で重要なことで、更に、坂井平野の高校や小学校に地震計を置くことは、小学校に幼稚園も併設されているので、高校生以下における理科教育や防災教育においても、貢献できると考えている。学校は地域の広域避難所にも指定されているので、地域の防災力向上にも役立つはずである。防災教育の充実というテーマも加味しながら、断層の研究が地域の防災意識の向上にどのように繋がっていくのかも含めて、以下、詳細について報告する。

*一般科目教室(自然科学系) okamoto@fukui-nct.ac.jp

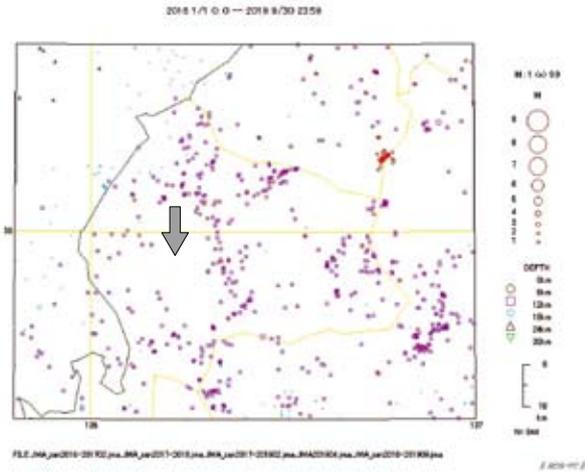


Fig. 1 Hypocentral map at Reihoku area by SEIS PC.



Fig. 3 Research program of SSH at Takefu High School.

2. 最新の震源

最新の気象庁による震源を、Fig. 1に示す。越前岬(136° E, 36° N 近く) 東部の低地震活動域(空白域)が、鯖江市付近になる。この空白域は、京都大学北陸観測所が設置されルーチンとして震源を求めた時から確認されており(私信)、確認以来45年近くになる。空白域の中央部(矢印)には鯖江断層(岡本他, 2007)⁵⁾が南北に走っており、一部10mの高さになる断崖を形成している。活断層を含む空白域は、地震の発生過程におけるなんらかのメッセージを示すと考えてよい。福井地震の余震の特徴としては、地震断層に沿って発生しているのではなく、坂井平野下全体に拡がりながら(広義の余震)発生していることである(例えば岡本, 2018)¹⁾。鯖江の空白域との関連も含めて、考察する。

3. 坂井平野西縁

坂井平野西縁部は、岡本(2018)¹⁾でも述べられているように、活断層による地形的特徴を示し、その活動度はかなり高い(崖等の明瞭さにより)と推察される。藤島高校のSSHの研究(例えば2019地球惑星科学連合大会による発表, Fig. 2)⁶⁾では、藤島高校で観測される地震波のS波について、最初の振動方向が地下構造の影響を受けていることに言及している。西縁部の断層構造が、藤島高校の西側まで延びている可能性も指摘している。すなわち、鯖江断層との関連が大いに危惧され、事実の確認が地域防災を考える上で、重要になってくる。



Fig. 2 Poster paper by Fujishima High School in 2019

4. 鯖江断層南限

鯖江断層の南部について、鯖江台地が高度を失ってから、明瞭な地形的特徴からの存在を推定するのは難しい。丹南地区の防災を考慮する上で、南部について研究し、断層のスケールを推定することは重要な命題である。地震活動と比較検討すると、空白域の大きさとの対応が重要な点になる。以上の観点を踏まえて武生高校のSSH⁷⁾では、鯖江市と越前市が発行する地形図の高度データを用いて、鯖江断層の活動による地上高度の変曲点を精査し、鯖江断層の南限が地震活動の空白域の南限と一致することを見出した。現在、過去の地形図や地下水の分布等の精査により、鯖江断層の位置の確実度を上げる取り組みを行っている (Fig. 3)。逆に、空白域の北限付近で鯖江断層がどのような形態で存在しているのか、地形的な特徴も含めて議論していくことが、重要になる。

5. 鯖江断層北部の形状と現状

これまでのレビューとしては、西山動物園の波形について、福井高専の地球物理学研究会や電子情報工学科の卒業研究として解析され、結果として、鯖江断層の活動度の高さが報告されている。藤島高校、金津高校、丸岡高校、三国高校、坂井高校、河合小学校の波形については、Hi-netの永平寺観測点の波形と比較し、地震と判断できる波形をWin systemにuploadし、震源決定が行われている。また、波形解析による結果として、地球惑星科学関連大会の高校生のセッションで、「福井地震断層の探究 I ~ VII」(福井県立藤島高校)⁶⁾のシリーズとして報告され、福井平野東縁断層帯内にあると考えられる金津高校・坂井高校において、水平動2成分のS波の到着時間差が一定に近く(同じ振動方向)になる現象を捉えることができたことが、指摘されている。振動方向によって波の横波の伝播速度が異なる現象は偏向異方性と言われ、極性を持つ媒質を伝わる時に認められる現象である。金津高校・坂井高校において特に顕著に認められた結果は、金津高校・坂井高校の直下にS波の速度関し極性の大きい構造が存在している事を示し、福井地震断層の断層構造に起因する現象である可能性を示している事になる。この事は、福井平野東縁断層帯、特に福井地震断層(西側断層)の繰り返しの活動を示す結果でもありと考えられ、東縁断層帯全体が断層破碎帯

の可能性もあることが分かった。また、藤島高校の波形で得られたS波の最初振動方向の解析から地下に南北方向の地下構造の可能性が指摘できたり、河合小学校の観測波形において、S波のコーダ部に大きな揺れを示す波形が得られたことが、「福井地震断層の探究 I ~ VII」で報告⁶⁾されている。兵庫県南部地震(1995, M7.3)で認められた震災の帯や鳥取県西部地震(2000, M 7.3)で認められた境港市の震度異常の成因と同じく、既存断層によるエッジ効果である可能性が、強く指示された。この断層が坂井平野西縁部の断層に相当し、岡本(2018)¹⁾に示された福井平野西縁断層の存在に繋がっている。逆に、坂井平野西縁部と鯖江断層北部の間には足羽山が存在し、足羽山がこれらの断層にどの様に影響を与えているのか、知る必要が出てくる。岡本(2016)²⁾は、福井地震の被害調査報告より足羽山への断層構造の回り込みを指摘している。一方、麻生津公民館より頂いた旧浅水川の流路 (Fig. 4)⁸⁾により、麻生津地区付近で旧河川が推定断層線に沿って北流していく様子が、はっきりと確認することができ、断層の存在を示す証拠となっている。地震活動の空白域の北限を注視する限り、鯖江断層は足羽山を越えて北部まで存在しなければならない。岡本(2016, 2017, 2018)^{1) 2) 3)}と旧浅水川の様子から、鯖江断層は足羽山付近で雁行しながら、坂井平野西縁の断層に繋がっていくと考えられる。Fig. 5(中道院)で示すように、現在、断層に沿って地変的な現象が認められ出したので、これらの情報を集めることで、鯖江断層の確実度と活動の次のステップへの見知を得たいと考えている。

6. 結論

一つは、鯖江断層が活動的な断層であることが明らかにされた。次に、西縁部について、藤島高校のS波の解析と河合小学校で観測された波形より、西縁断層の存在の可能性を示す地下構造の存在やエッジ効果に伴うS波や典型的なSコーダ波形を含む記録がとれていることが分かった。重力の結果等を含めて最終的に、福井平野の坂井平野区西縁は、活断層であると結論づけられ、さらに、西縁部の断層はその走向により、鯖江断層との関わりが危惧されるなか、浅水川の旧河川の様子や福井地震の被害状況の様子などから、鯖江断層が南部から北部にかけて足羽山付近で雁行していくモデルが推定できた。



Fig. 4 Geographical map of old Asouzu river.

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり、福井地方气象台（磯部英彦台長）、石川有三博士（防災科研）及び京大防災研北陸観測所（西上欽也所長）より、震源情報を頂きました。各地震の観測点では、飯尾能久教授（京大防災研）、鯖江市西山動物園（金田飼育員）、藤島高校（前田先生）、金津高校（坂東先生）、丸岡高校（鈴木先生）、三国高校（上山校長先生）、坂井高校（山口校長先生）、河合小学校（前川校長先生）にご対応を頂きました。解析では、藤島高校 SSH プログラムの生徒諸君、武生高校 SSH プログラムの生徒諸君、糸見先生、酒井先生、谷口先生（武生高校）、岩堀博士（慶応大学）、電子情報の野村先生と卒研究生（田邊君、河野君、三澤君、宮本君、巢守君、山浦君）、福井高专地球物理学研究会の諸氏に協力を頂いています。以上の方々に記して



Fig. 5 Geographical phenomenon of Sabae Fault.

感謝致します。なお、費用の一部は JST の SSH プログラムの予算を使用しています。

参考文献

- 1) 岡本拓夫, 福井平野西縁断層の確実性—福井地震から 70 年—, 福井工業高等専門学校研究紀要, 自然科学・工学, 第 52 号, pp. 11 – 16, (2018).
- 2) 岡本拓夫, 福井平野西縁部と鯖江断層, 福井工業高等専門学校研究紀要, 自然科学・工学, 第 50 号, pp. 59 – 62, (2016).
- 3) 岡本拓夫, 福井平野区における地震観測 II – 河合小学校観測点の増設 –, 福井工業高等専門学校研究紀要, 自然科学・工学, 第 51 号, pp. 23 – 27, (2017).
- 4) 野口竜也・中谷英史・香川敬生・安井謙・小嶋啓介, 重力データに基づく福井平野及び鯖江盆地の 3 次元基盤構造の推定, 第 31 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集, (2011).
- 5) 岡本拓夫・橋本たづの・山本博文・小嶋啓介・井上哲夫, 鯖江断層トレンチ調査—経緯—, 福井工業高等専門学校研究紀要, 自然科学・工学, 第 41 号, pp. 105 – 112, (2007).
- 6) 藤島高校 SSH 地球惑星科学連合大会, 福井地震断層の探究 I ~ VII, (2013 – 2019).
- 7) 武生高校 SSH, (2016 – 2019).
- 8) 麻生津公民館, 私信, 2019.

ホウ酸バリウム系ガラスにおける β -BBO 結晶の析出と TTT 図

長谷川智晴*

Crystallization of β -BBO in Barium Borate Glasses and TTT Diagram

Tomoharu HASEGAWA

The crystallization process of $48\text{BaO}-48\text{B}_2\text{O}_3-4\text{TiO}_2$ glass is investigated to understand the onset of crystallization process and obtain the Time - Temperature - Transformation (TTT) diagram. The annealed bulk glass samples of practical volume were successfully fabricated from raw materials in this work. The heat treatment for crystallization was carried varying the temperature and duration. The glass was devitrified by the heat treatment and the crystallization of β -phase BaB_2O_4 was confirmed by X-ray diffraction measurements. At 625 and 650°C, the onset time of crystallization was clearly determined since the crystallization proceeded slowly. The TTT diagram and estimated TTT curve are obtained as results of these measurements. The glass composition is also discussed because the TiO_2 addition would make the glass stable.

Keywords : Glass, Crystallization, β -BBO, XRD, TTT-diagram

1. はじめに

ガラスを適当な温度と時間で熱処理すると、ガラス中に微細な結晶が析出する。この現象はガラスの結晶化、または失透と呼ばれている。また、結晶が析出したガラスを、結晶化ガラスまたはガラスセラミックスと呼んでいる。ガラスは透明性、均質性、成型加工性に優れ、広く応用されているが、類似組成の結晶にくらべ際立った物性を示すことが少ない。しかしガラスを結晶化させると、結晶の物性を反映するようになるため、母ガラスに比べて、光学特性、熱耐久性、機械的強度などの物性が向上することがある。そのため、材料開発においてガラスの結晶化を積極的に取り入れる場合も多い。

ガラスの結晶化は古くから研究され、そのプロセスは初等的な熱力学でよく説明できる。ガラスは急冷された過冷却液体が固化したもので、その微細構造（原子の配列）は液体状態のようにランダムなまま固定されている。これは、低温で粘性が極端に高いため、原子の移動・拡散が妨げられていることが理由であり、ガラスは安定平衡状態ではなく準安定状

態にあると言える。最もエネルギーが低く、熱的に安定な構造は結晶構造であるため、ガラス転移点 (T_g) 以上に加熱し流動性が高まれば、ガラス中に結晶核が生成し、十分な時間のち結晶が成長する。これがガラスの結晶化である。

ガラスの結晶化は、主に熱処理温度と熱処理時間の二つのパラメータによって支配される。特に、熱処理温度には結晶化に最適な領域があり、それよりも温度が高い、または低いと結晶成長が阻害される。結晶化の最初期には、熱揺らぎによって確率的に結晶の幼核が生成し、その生成確率は温度が低いほど高い。一方、温度が高いほど、原子の移動・拡散が容易となり、結晶核が安定な大きさまで成長しやすくなる。この両者のバランスから、ガラスの結晶化が最も早く進行する温度域が決められる。結晶成長に適した温度域では、析出する結晶の数や大きさは、その後の熱処理時間によって増大する。ガラスの結晶化については多くの成書があるため、詳細はそちらを参照されたい [1]。

上に述べたように、ある温度に固定されたガラスは時間とともに結晶化が進行する。材料工学で一般的に用いられる

*一般科目教室（自然科学系） hasegawa@fukui-nct.ac.jp

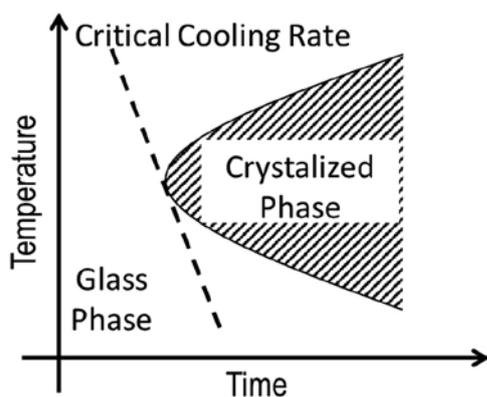


図1 TTT 曲線の概念図。
点線の傾きが臨界冷却速度に相当する。

ような平衡状態図は時間の概念がなく、組成と温度で一意的に状態が決定されるため、ガラス結晶化のプロセスを表現するには不向きである。ある組成におけるガラス結晶化のプロセスを一枚の図に表現したものが、Time-Temperature-Transformation Diagram と呼ばれるものである（以下 TTT 図と略記する）。図1に TTT 図の概念図を示す。TTT 図は、横軸に熱処理時間、縦軸に熱処理温度を取り、ある温度、ある時間の熱処理を行ったときに、ガラスが結晶化するかどうかを示すものである。また、ガラス相、結晶相の境界に引いた線を TTT 曲線という。曲線が最も左側にせり出している部分をノーズと言い、この温度で結晶化が最も早く進行する。また、図中の点線は融点からノーズに引いた接線であり、その傾きは臨界冷却速度と言われる。ガラス融液を臨界冷却速度より速く冷却すれば、その降温過程において結晶が析出することはない。透明なガラスを作製する場合、結晶生成は避けねばならず、そのため、臨界冷却速度はガラス製造において大変重要なパラメータである。TTT 図はそれを視覚的にとらえることができる有力なツールである。

さて、ガラスの結晶化については広く知られているところであるが、意外にもその初期過程について関心が払われることは少ない。たとえば、結晶核生成のダイナミクスの直接観測は、測定の大変さもあってその事例は多くない。また、TTT 図も温度と熱処理時間という2種類のパラメータを振ってマッピングを取る必要があり、実際に測定されているガラス系は多くない。

筆者の行っている研究では、ガラス結晶化の初期過程に注目し、その初期過程で物性値の変化を検出することを大きな目的としている。結晶化直前直後の物性の変化を、何らかの

手法で評価できれば、長い歴史のある結晶化ガラス研究の進展に少しでも寄与できるのではないかと期待している。

ガラス結晶化の初期過程をなるべく簡便な評価方法で観測するためには、適切なガラス系と評価方法の選定が重要である。析出する結晶は母ガラスの組成と熱処理条件に依存するが、結晶の物性値が母ガラスと大きく異ならなければ、物性値の変化はわずかであり、その検出は困難になる。そこで本研究では、誘電率、屈折率、二次光学非線形などに顕著な物性を示す、非線形光学結晶・ β 相メタホウ酸バリウム（ β 相 B_2O_3 , 以下 β -BBO と省略）の析出が知られている、バリウムホウ酸塩系ガラスを選択した [2]。ホウ酸塩系のガラスは窓ガラスなどの一般的なガラスとして広く使われているシリケート系ガラスに比べ、低温での溶解が可能で結晶化温度も低めであるため、本校の設備でも十分サンプルの作製が可能である。

本稿は、バリウムホウ酸塩系ガラスの作製、結晶化と、TTT 図の取得について述べる。まず、はじめにガラスの作製について説明する。本研究ではレンズ等の実用ガラスと同じく、原料の溶解、流し出し、徐冷を行い、実用可能な十分な大きさのガラス試料を得ることから始めている。ガラスは少量の融液を急冷すれば容易に得られるため、多くの基礎研究では、水冷やプレスなど極端な急冷法でごく少量のガラスを作製することが多い。しかし、単結晶など他の材料と異なり、ガラスは試料の大きさや形状に依存して、製造条件や性状が大きく異なる場合が多い。従って、実用を考えると、できるだけ大きな試料、実際の製造に近い条件での研究が重要であると思われる。この点を考慮し、実用的なサイズの試料で検討を行っていることが本研究の大きな特色である。

試料作製に続いて、その後の結晶化熱処理について説明する。TTT 図は、熱処理温度と時間の2次元でマッピングを取るため、複数の温度で実験を行っている。また、温度によって結晶化速度が大きく変化するため、熱処理時間は最長で30時間に及んだ。次いで、ガラス結晶化の評価について述べる。結晶化有無の判定と、結晶相の同定は、一般的なX線回折法によって行った。これらの実験結果から TTT 図を得ることができた。

最後に、今回のガラス組成で添加されている TiO_2 の働きについて、これまで得られている知見についてコメントする。

2. ガラスの作製と結晶化熱処理

本研究では組成式 $48\text{BaO}-48\text{B}_2\text{O}_3-4\text{TiO}_2$ のガラスを作製した。このガラスは、すでに示差熱分析 (DTA) によってガラス転移点 $T_g=534^\circ\text{C}$ 、および結晶化温度 $T_x=632^\circ\text{C}$ が報告されている。また、熱処理によって β -BBO の析出が認められている [3]。

まず、ガラス試料の作製について述べる。原料として、試薬グレードの無水ホウ酸、炭酸バリウム、および二酸化チタンを用いた。得られるガラス重量が 20 g となるように原料を秤量し、十分混合したのちアルミナるつぼに入れ、 1100°C 、空気雰囲気中で 1 時間溶解した (図 2)。ガラス融液はカーボンモールド上に流し出しガラス化させた。得られたガラスは気泡を含まず、着色は見られなかった。ガラス試料は、流し出し直後に徐冷炉に投入された。徐冷はガラス転移点よりやや上の 550°C で 1 時間保持したのち、 $-1^\circ\text{C}/\text{分}$ で降温することにより実施した。徐冷後のガラスは適切に除歪され、熱による割れは見られなかった (図 3)。ホウ酸塩系ガラスはアルミナるつぼを侵食することが知られている。本研究でもるつぼ内壁に侵食跡が見られたために、アルミナの混入があるものと思われる。この点については後述する。

得られた $48\text{BaO}-48\text{B}_2\text{O}_3-4\text{TiO}_2$ ガラスを熱処理すると、白濁した結晶化ガラスを得ることができる。図 4 に 625°C 、30 時間の熱処理によって結晶化させた試料を示す。ガラス中に微小な結晶が無数に析出したため透明性を失い (失透)、白濁していることが分かる。すでに述べたように、結晶化の有無は、温度と時間に依存する。結晶が析出すれば、その数と大きさは熱処理時間に従って増加する。これを TTT 図で視覚的にあらわすことができる。TTT 図の取得には、多数のガラスサンプルが必要なため、結晶化ガラスの試料は数 mm 程度の小片に切り分けて用いた。ガラス小片を清浄なアルミナ皿に点接触になるよう設置し、所定の温度に設定した熱処理炉中に投入し結晶化を行った。

3. ガラス結晶化の評価

熱処理した試料を乳鉢で粉碎し、粉末 X 線回折 (リガク製 Ultima IV, Cu-K α 線 40kV, 以下 XRD と省略) によって評価を行った。図 5 に 625°C 、1 ~ 30 時間熱処理を行った試料

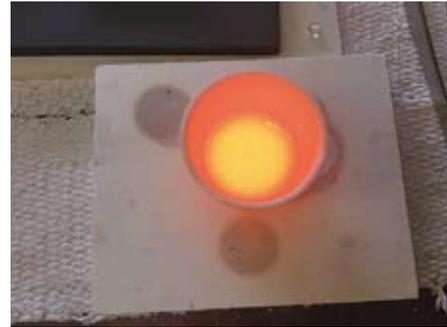


図 2 $48\text{BaO}-48\text{B}_2\text{O}_3-4\text{TiO}_2$ ガラス融液の外観。

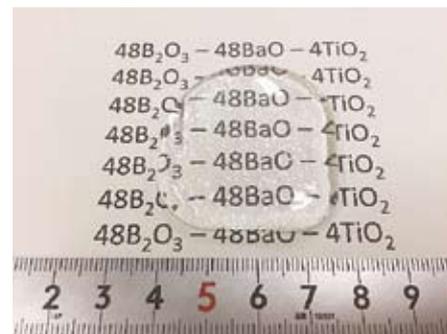


図 3 徐冷後の $48\text{BaO}-48\text{B}_2\text{O}_3-4\text{TiO}_2$ ガラス。



図 4 625°C 、30 時間熱処理した $48\text{BaO}-48\text{B}_2\text{O}_3-4\text{TiO}_2$ 結晶化ガラス。

で得られた XRD の結果を示す。1, 3 時間の熱処理では結晶による回折ピークは見られず、ガラスに特有なハローのみが見られる。10 時間熱処理で結晶化によるピークが出現し、熱処理時間の増加に伴い結晶化が進展し、ピーク強度が増大していくことが分かる。析出結晶相は、既報の通り β -BBO であることが確認された。ガラス結晶化の有無の判定にはいくつかの方法があるが、本研究では XRD のピークの有無で結晶化を判定することにする。同様の熱処理を 650°C 、 675°C で行い、結晶化の有無を確認した。いずれの温度でも析出相は β -BBO であった。

1 一般的に、体積分率が 10^6 程度に達すると XRD にピークが出るとされている。結晶化の判断にこれを用いる場合が多い。

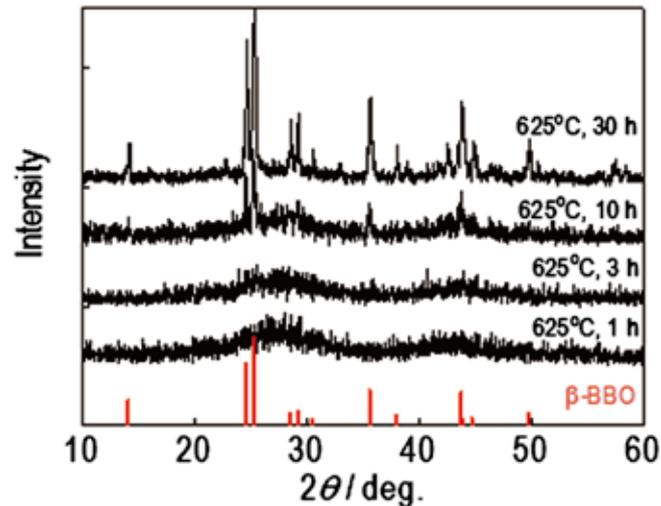


図5 625°Cで熱処理した試料のXRDの結果. 参考にβ-BBO単結晶の回折パターンを示す.

ガラス結晶化には、均一核生成と不均一核生成の2種類がある。結晶化開始直後の試料を実体顕微鏡観察したところ、表面から結晶が成長していた。従って、この結晶化は不均一核生成が主である。不均一核生成は、試料表面や治具との界面が結晶核生成に強く影響するため、結晶化条件が実験によって変化する可能性があることには注意を要する。図6に、650°C、2.5時間熱処理によって結晶化させた試料の表面SEM観察像を示す（日本電子製 JSM-7001F）。1μm程度の大きさの構造が確認される。この構造はおそらく析出結晶によるものと思われるが、結晶生成明瞭に認めることはできなかった。溶出したホウ酸成分により表面が覆われている可能性が考えられる。

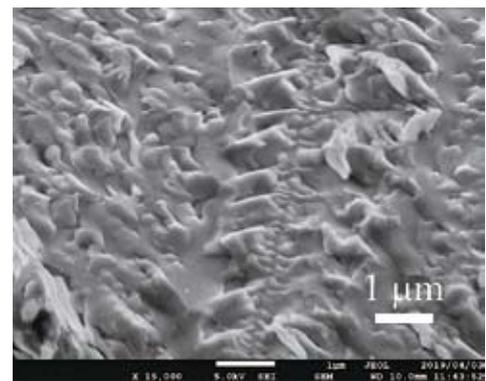


図6 650°C、2.5時間熱処理サンプルの表面SEM観察像.

4. TTT 図

図7に、本研究で得られた48BaO-48B₂O₃-4TiO₂ガラスにおける熱処理温度および時間と、結晶化の有無についてマッピングしたTTT図を示す。また、推定されるTTT曲線を破線によって示す。625、650°Cでは、結晶化の進行が数時間程度と遅く、結晶化開始時間を明瞭に決定することができた。一方、675°Cでは結晶化の進行が急激に速くなり、さらに、試料によって結晶化開始時間が変動したため、結晶化開始時間を精度良く決めることができなかった。そのため675°C近

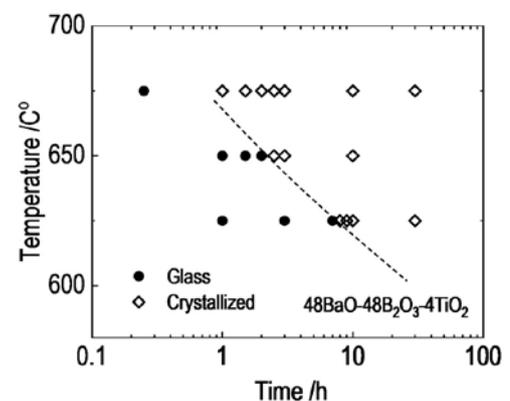


図7 48BaO-48B₂O₃-4TiO₂ガラスのTTT図.

傍の TTT 曲線はあくまで推定である。結晶化開始時間の変動の理由は、おそらく、電気炉中の試料位置で温度が変動することや、サンプルの形状により表面結晶化の閾値が異なることが理由ではないかと推察される。また、675°C より高い温度では、試料の熱変形が大きくアルミナ皿との癒着が激しいため評価を行わなかった。

本研究で得られたデータのみでは TTT 曲線のノーズが明確ではないため、臨界冷却速度を求めることは大変困難である。仮に、675°C を仮定すると、およそ-0.1K/sec のオーダーを得る。この値はゲルマン酸ガラスに近く、ガラスとしては作製容易な部類であると考えてよい。

5. 組成依存性について

5・1 TiO₂ の役割

本研究では、目的とする析出結晶が組成式 BaB₂O₄ であるため、母ガラスの組成も化学量論的に結晶と同じ BaO:B₂O₃=1:1 とし、組成式 48BaO-48B₂O₃-4TiO₂ のガラスを作製した。また、本研究では TiO₂ 含まない組成である 50BaO-50B₂O₃ ガラスについても検討を行った。48BaO-48B₂O₃-4TiO₂ ガラスと同じく、50BaO-50B₂O₃ 組成においても良好なガラスを得ることができた。しかし結晶化熱処理の結果、650°C、1～1.5 時間の熱処理で 50BaO-50B₂O₃ ガラスに結晶化がみられた。図 7 にみられる通り、この熱処理条件で 48BaO-48B₂O₃-4TiO₂ ガラスは結晶化していない。また、析出相は β -BBO ではなく、BaO と B₂O₃ であった。このことは、50BaO-50B₂O₃ ガラスが 48BaO-48B₂O₃-4TiO₂ ガラスにくらべ、不安定なガラスであることを示している。BaO-B₂O₃ 二成分系の平衡状態図によると 50BaO-50B₂O₃ 組成は液相線のピークに相当しているため [4]、熱処理によって分相が進行した可能性がある。このことから、48BaO-48B₂O₃-4TiO₂ ガラスにおいて、TiO₂ はガラスの安定化に寄与していることが分かる。Pernice らは、FTIR 測定と DTA 分析から、このガラス系に Ti を添加すると、Ti がガラスネットワークに入り、ガラスの熱的安定性が向上することを報告している [3]。

5・2 Al₂O₃ の混入について

本研究では設備上の制約が理由でガラスの溶解にアルミナるつぼを用いている。本来、多成分系酸化ガラスの溶解

は、不純物混入の恐れがなく、高温での溶解に適した白金るつぼで行うことが望ましい。本研究で得られたガラス試料について、エネルギー分散型 X 線分析 (EDX) を行った結果、0.1～1wt.% 程度の Al₂O₃ の混入が推定された。BaO-B₂O₃-Al₂O₃ 系ガラスでは Al₂O₃ がガラスを安定化させ、結晶化プロセスに影響を与えることが報告されている [5]。本研究での Al₂O₃ 混入が結晶化に与える影響は不明であるが、今後調査が必要であると考えている。また、石英るつぼでの溶解を試みたが、ガラス融液と石英るつぼが反応しシリケート系ガラスが形成され、流し出し時点で激しく失透した。今後は、Al₂O₃ を含まないるつぼ材料の検討も必要である。

6. まとめと今後の展望

ガラス結晶化の初期過程を詳細に調べる対象として、48BaO-48B₂O₃-4TiO₂ ガラスを選択し、その結晶化について詳細に調べた。得られたガラス試料は良好な性状を示し、気泡がなく無色透明であった。また、徐冷により除歪された試料を得ることができた。結晶化熱処理を 625～675°C、30 時間までの範囲で行った。結晶析出の有無と、結晶相の同定は XRD により行った。温度の上昇により結晶化開始時間は急速に早まることが確認された。同定された結晶相は β -BBO であった。得られた結果から、TTT 図を得ることができた。

TiO₂ を含まない 50BaO-50B₂O₃ ガラスは短い熱処理時間で分相起因と思われる結晶化を示し、このガラス系では TiO₂ がガラス安定化に寄与していることが分かった。一方、本研究のガラス作製プロセスでは Al₂O₃ の混入がみられ、今後その影響を調べる必要がある。

筆者は、前回の報告で結晶化ガラスの評価方法について紹介した [6]。引き続き本稿で 48B₂O₃-48BaO-4TiO₂ ガラスの結晶化について知見を得ることができた。序論で述べたように、本研究の目的は、ガラス結晶化前後での物性変化の観測である。今後は本ガラス系において β -BBO 析出による物性変化を観測する手段を検討する予定である。

参考文献

- [1] たとえば, J. E. Shelby “Introduction to Glass Science and Technology (2nd Ed.),” Royal Society of Chemistry, 2005, Chapter 2.
- [2] A. Bhargava, J. E. Shelby, R. L. Snyder, *J. Non-Cryst. Solids*, vol.102 (1988) 136 - 142.
- [3] P. Pernice, S. Esposito, A. Aronne, *Phys. Chem. Glasses*, vol.39 (1998) 222 - 227.
- [4] 佐藤 博, *日本金属学会誌*, vol.70 (2006) 395 - 401.
- [5] P. Pernice, S. Esposito, A. Aronne, V. N. Sigaev, *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 258 (1999) 1 - 10.
- [6] 長谷川智晴, 福井工業高等専門学校研究紀要 自然科学・工学, 第51号 (2017) 29 - 31.

体育授業におけるストロボ画像を用いた動きの自己分析の試み： 高専男子学生の走幅跳パフォーマンスに及ぼす効用

松井 一洋*¹ 東 章弘*

A study on self-analysis of the movement using a strobe picture: its effect on college male students' long jump performance

Kazuhiro MATSUI and Akihiro AZUMA

The aim of this preliminary study was to investigate whether feedback based on self-analysis of the movement using a strobe picture could affect participants' long jump performance. Male college students ($n = 51$, average age 17.5 years) learned and practiced running long jumping for five consecutive days (Day 1 to 5) in a physical education class. On Day 4 and Day 5, sagittal plane motions of their maximal jumps were video-recorded and then processed into strobe pictures using an iPad application software, enabling the participants to analyze their initial velocity and takeoff angle using a conventional digitizing software. Participants were instructed to analyze and derive the data by themselves after the class on Day 4 and Day 5, respectively. The results showed no significant difference in average jumping distance between Day 4 and Day 5. However, the correlation coefficient between a jumping skill metric and the change in distance from day 4 to day 5 was significant ($p < 0.05$); in other words, participants with greater skill were able to achieve greater improvement after self-analysis feedbacks. Also, 29% of all subjects who improved their jump from Day 4 to Day 5 achieved increases in both their initial velocity and takeoff angle, as compared to only 9% of the subjects whose jumping distance decreased. The self-motion analysis also helped students to recognize the relationship between physical exercise and physics concepts that they had learned previously.

Keywords: PE class, Running long jump, Strobe picture, Jump skill, Self-analysis

1. 緒言

体育授業においては、視聴覚教材としてのビデオの活用が叫ばれて久しい (Fukkink et al., 2011)。ビデオは動作を何度も繰り返して確認できることや動きの直感的な理解を導き、スポーツ (James, 1971; Neufeld and Neufeld, 1972; Sewall et al., 1988; Van Wieringen et al., 1989; Macrae, 2003; Kelley and Miltenberger, 2016) のみならず体育授業 (Weir and Connor, 2009) においても有効な指導デバイスといえる。近年では、パソコンやタブレット端末で扱うことのできる動画 (digital movie) が活用され、動画は学習者への動きに対する認識を深め (東ら, 2004)、アクティブラーニングを実現す

る上で効果的といわれている (文部科学省, 2018)。

また、タブレット型端末と付属するカメラ機能の進歩により動画撮影は簡便化し、動画編集ソフトも安価となってきた。授業参加者自身がこうしたデバイスを利用し、自ら学習する形態はまさに ICT (Information and Communication Technology) 教育の真骨頂といえよう。体育授業においては、タブレット端末を利用した視覚的フィードバックによる観察力育成や、運動イメージの形成、言語を介した運動イメージの共有による技能習得の可能性が報告されている (Rohleder and Vogt, 2018; 宍戸と橋元, 2019)。さらに、運動技術の改善に資する数量化データを専門的な動作解析によって動画から導くには複雑で高価な装置が必要となるため、そのような

*一般科目教室 (自然科学系) ¹ matsui@fukui-nct.ac.jp

データを用いた体育授業の実践に関する研究は極めて少ないのが実情である (Wilson, 2008)。

一方、外的要因に左右されない運動としてのクローズドスキル型スポーツにおいては、対象とする動作の動画 (パフォーマンス情報)の活用が動きの改善に有効であることが知られている (Cooper and Rothstein, 1981)。また、クローズドスキル型スポーツでは、(動きの再現の観点から) 速度や角度などのバイオメカニクスの情報 (パラメーター)の提供が動作の改善に有効であることから (Gorman et al., 2019)、動画のフィードバックとともに ICTによってそのようなパラメーターを学習者が容易に導き、学習に役立てる手法の開発が期待される。走幅跳は走力と跳躍力を組み合わせたユニークなクローズドスキル型種目のひとつであり、小学校から高校までの体育授業で広く採用されていることから、本研究では、理工系学生 (高専学生) を対象とし、走幅跳のバイオメカニクスのパラメーター (数値データ) を学習者自らが取得してフィードバックとする授業を試みた。すなわち、学習者自身が動きを分析できる環境として、一枚の画像に動きの残像が描写されるストロボ画像とそれを座標化するソフトウェアを用い、取得した動きのパラメーターを動作の改善に活用できるかどうかを調べた。さらには、理数学習としての物理概念と身体運動とが関連事象として捉えられたかについても調べた。

したがって、本研究の目的は、走幅跳の体育授業において、

ストロボ画像を用いた動きの自己分析によるフィードバックが跳躍距離に及ぼす影響を検討することであった。

2. 方法

2・1 被検者

被検者は健康な51名の男子学生であり (年齢: 17.5 ± 0.8 歳, 身長: 172.0 ± 6.0 cm, 体重: 61.0 ± 8.6 kg), 走幅跳の跳躍に支障を及ぼすような障害や既往歴のある被検者は含まれていなかった。本研究は正課の体育授業として行われ、被検者はすべて授業の受講者であった。本研究を実施するにあたり、あらかじめ研究の目的、方法、および成果の公表について被検者に説明し、すべての被検者から書面による同意を得た。なお、本研究は福井工業高等専門学校の研究倫理審査委員会にて承認を得たものである (番号: 30-1, 31-2)。

2・2 研究手順

本研究における走幅跳の単元は全5回の授業 (Day 1-5) で構成され、初回授業 (Day 1) においては、助走、踏み切り、空中姿勢、および着地の各局面についての基礎的なガイダンスがなされた。その後、砂場にて着地練習を兼ねた立ち幅跳びと、踏切板を用いた踏切練習を行った。また、各被検者の跳躍スキル評価 (Speed-effectiveness index; 後述) の計算に用



Photo 1. An example of strobe picture used for digitizing. Images were reversed laterally for the analysis.

いる 50 m 走タイムを計測した。Day 2 と Day 3 では助走距離を段階的に伸ばしながら跳躍練習が行われた。すなわち、助走距離は、最初は 5 m とし、続けて 10 m, 15 m と延伸させ、Day 3 の最終段階では、最大跳躍のために必要な助走距離（全助走距離）を被検者自身に定めさせた。Day 4 と Day 5 では全助走距離による最大努力での跳躍を行わせ、それらの跳躍距離を計測した。

Day 4 と Day 5 で行われた最大跳躍時の動作は、矢状面から iPad® (A1701 model, Apple Inc.) を用い、あらかじめインストールされたストロボ画像編集ソフト、モーションショット (Version 1.0.6, Sony Network Communications Inc.) によって撮影された。このソフトウェアは、撮影後に一定時間間隔で残像が描写される一枚のストロボ画像 (JPEG 形式) を自動的に生成する。本研究では、各被検者の最大跳躍 (Day 4 と Day 5) 時の助走中盤から着地の間を撮影した際の、0.27 秒毎の残像が描写されたストロボ画像を得た (Photo 1)。

Day 4 の最大跳躍の計測後、被検者は授業においてストロボ画像の分析方法について指導された。分析は放課後の課題として次回の体育授業 (Day 5) までに行うこととした。被検者にはデジタイジングソフトウェアである WebPlotDigitizer (Ankit Rohatgi 製作)、各自のストロボ画像、および分析用スプレッドシートがそれぞれ同梱された USB フラッシュメモリを手渡し、デジタイジングソフトウェアを用いて、ストロボ画像中の (各残像の) 左大転子位置のデジタイジング (座標化) を指示した。座標はソフトウェア内でのキャリブレーション (較正) に基づいて換算されるため、大転子位置の座標は m 単位のデータとして CSV 形式で出力された。一方、分析用スプレッドシートは検者によって Microsoft® Excel® 2016

で作成され、あらかじめ組み込んだ計算式により CSV 形式データを貼り付けるだけの処理で踏切時の初速、踏切角等の分析パラメーターが自動的に算出されるようにした。被検者はこれらのツールを用いて、各自の分析パラメーターを導いた (Photo 2)。なお、Day 5 の授業後にも同様の分析作業を課した。WebPlotDigitizer は私作の無料ソフトウェアではあるが、医学系論文をはじめとして画像分析に広く用いられ、座標化の精度や角度算出の信頼性が多数報告されている (Carlson et al., 2016; Mani et al., 2018)。被検者は Day 4 後の分析作業を通して自分自身の動きを振り返り (分析フィードバック)、データを意識して 2 回目 (Day 5) の最大跳躍を行った。

さらに、Day 5 の後にリフレクションシートにおいて、被検者に Day 4 と Day 5 における最大跳躍距離や分析パラメーターを整理させた。また、走幅跳の動きと物理の関連性についての理解を調べるため、踏切後の身体重心の動きを斜方投射とみなした物理式についてリフレクションシートにおいて記述回答させた。なお、斜方投射は被検者の所属校において全員が第一学年時に履修済みである。

2・3 分析方法

Day 4 のストロボ写真の分析フィードバック前の跳躍距離は、フィードバック後の Day 5 の跳躍距離と比較された。また、すべての被検者 (集団) の 50 m 走タイム (X) と跳躍距離 (Y) から導いた直線回帰方程式 ($Y = aX + b$) に、個々人の 50 m 走タイムを代入することで得られる予測跳躍距離を実測跳躍距離で除することで Speed-effectiveness index (SEI) を下式により求めた (Azuma and Matsui, 2018; Azuma and Matsui, 2019)。

$$SEI = \frac{\text{Actual jump distance (m)}}{\text{Estimated jump distance (m)}}$$

さらに、個々人の分析フィードバック前後の跳躍距離の差 (delta jump distance, ΔJD) と SEI との関係性を調べた。加えて、分析フィードバック後の跳躍距離が大きくなった群 (JD-Up 群) と小さくなった群 (JD-Down 群) に分け、分析用スプレッドシートで導かれた踏切時初速と踏切角の分析前後の変化を調べた。



Photo 2. A scene of the self-analysis.

2・4 統計処理

ストロボ写真の分析前後の跳躍距離の平均値の差の検定には対応のあるt検定を用いた。また、 ΔJD とSEIの関係はピアソンの積立相関係数によって求めた。すべての統計的有意水準は5%とした。

3. 結果および考察

3・1 分析フィードバック前後の跳躍距離の変化

分析フィードバック前の跳躍距離(平均 \pm SD)は4.12 \pm 0.51 m (Day 4), フィードバック後は4.19 \pm 0.52 m (Day 5)と両者の間に有意差は認められなかった。ストロボ写真の分析はあくまで被検者による動作省察のフィードバックであり、体育教師やコーチなどの他者の視点による指導とは異質の介入であった。その結果、自己分析は平均的には跳躍距離を変化させなかった。一方、自らの動きのフィードバックという観点で、Matsui and Azuma (2018, 2019)は、走幅跳の体育授業において最適助走距離の自己計算をさせた前後での跳躍距離にも平均的には変化はなかったと報告している。したがって、動作を自己分析するというフィードバックそのものが体育授業の中で直ちに動きを改善させるとは考えにくいと推察された。

3・2 分析フィードバック効果の個人差

ΔJD とSEIの間の相関は有意であり (Figure 1, $r = 0.331$, $P < 0.05$), 分析フィードバックによって、SEIが大きい被検者ほど跳躍距離が増大する傾向がみられた。すなわち、疾走能力をより跳躍距離に生かせる者ほど(とりわけSEI > 1), 分析を踏切動作の改善に役立てられた可能性がある。しかしながら、SEI < 1の被検者は分析フィードバックによって記録が低下した。一般に、テクニックの改善には多くの練習を必要とするため、授業内の限られた練習だけではかえって動きの不調和を生じさせた可能性がある。SEIは跳躍スキルを反映することから (Azuma and Matsui, 2018; Azuma and Matsui, 2019), 動作分析によるフィードバックはスキルの低い者にとって即時効果が得られなかったといえる。また、 ΔJD とSEIの間の相関は有意ではあったが強いとはいえず、決定係数(r^2)は0.109であることから、SEIは ΔJD の変動のおよそ1割を説明するにとどまった。

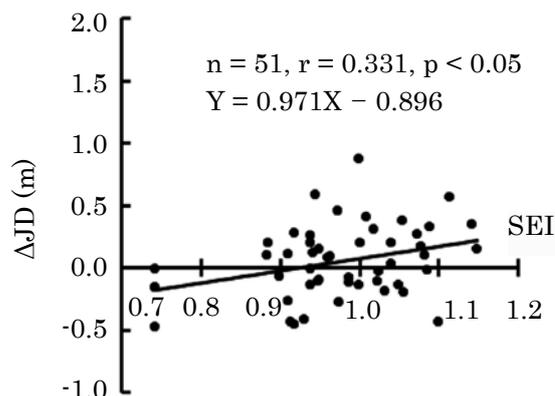


Figure 1. Relation between delta jump distance (ΔJD) and speed-effectiveness index (SEI).

3・3 跳躍距離の増減と分析パラメーターとの関係

跳躍距離が増加したグループ (JD-Up 群: ΔJD が+の者; $n = 26$) と減少したグループ (JD-Down 群: ΔJD が-の者; $n = 23$) において、初速と踏切角が増加 (a), 踏切角のみ増加 (b), 初速のみ増加 (c), 両方が減少した被検者の割合を Table 1 に示した。分析フィードバックの結果、両群ともに6~8割の被検者に踏切動作の変化(改善)が導かれ、初速と踏切角の意識が高まったことがうかがえた。いずれかのパラメーターの増加が認められた被検者 (a, b, c) は JD-Up 群で 78.6%, JD-Down 群では 60.9% であり、両群の差は a の割合の差が主因であった (JD-Up 群: 28.6%, JD-Down 群: 8.7%)。すなわち、上記 a の割合の差異は ΔJD が正であるか負であるか (JD が増加したか減少したか) を決定付けた。踏切角を大きくすることは初速の減速を導くことから (深代, 1983), 2つのパラメーターを同時に増加させることは難しい。しかしながら、JD-Down 群 (8.7%) に比べて JD-Up 群では多くの被検者 (28.6%) が2つのパラメーターを改善させ、パフォーマンスを向上させた可能性がある。なお、フレーム率を考慮すると正確な踏切時のストロボ画像が得られていない可能性があり、初速や踏切角はあくまで概算値であるが、初速と踏切角の増加 (Day 4 vs Day 5) の程度は両群併せてそれぞれ、+6% (7.3 ± 1.3 m/s vs 7.7 ± 1.1 m/s, $n = 22$), +18% (12.4 ± 3.9 度 vs 14.6 ± 4.0 度, $n = 20$) であった。踏切角は16~26度が至適範囲であると指摘されるように (深代, 1983; 坪井, 1996), その増加は好ましい改善であると位置付けられた。

Table 1. Number of participants and the percentages that changed initial speed and/or takeoff angle in each group.

Group	Increase of speed & angle	Increase of angle	Increase of speed	Decrease of speed & angle
JD-Up	8 (28.6)	8 (28.6)	6 (21.4)	6 (21.4)
JD-Down	2 (8.7)	6 (26.1)	6 (26.1)	9 (39.1)

JD-Up: Participants (n= 28) who improved their jump distances
 JD-Down: Participants (n= 23) who did not improve their jump distances

Number in parenthesis indicates percentage (%)

3・4 理数学習との関連

リフレクションシートにおいて、踏切後の身体重心の動きを斜方投射とみなした物理式について回答させた結果 (Table 2), 単元終了時に半数近くの被検者 (49.0%) が完全な数式 (斜方投射), または部分的な数式を記述し, かつ, 45.1% が斜方投射に関連する物理変数を回答することができた. すなわち, 何らかの物理概念を導いた被検者は全体の 94.1% であり, ほとんどの被検者が過去の物理の授業で学習した内容と運動とを結びつけて洞察することができたと考えられた.

Table 2. Number of participants and its percentage of the answer patterns on the projective motion of the body during jumping (n = 51).

Answer patterns	Number	Percentage (%)
Complete equation	4	7.8
Partial equation	21	41.2
Variables only	23	45.1
Others	3	5.9

4. 結論

本研究では、走幅跳の体育授業において、学習者自らがストロボ画像とデジタイジングソフトウェアを用いて動きを分析し (分析フィードバック), 跳躍技術の向上に役立てる試みがなされた. その結果, 分析フィードバックは平均的には学習者の跳躍距離を増大させなかったが, 個人差の観点から跳躍スキルの大きい者ほど跳躍距離は増加する傾向が認められ, 分析フィードバックの効果は部分的に観察された. また, 跳躍距離の増加したグループには踏切時の初速と踏切角の両方を改善させた者が多く含まれていた. 一方, 理工系学生である本研究の被検者の多くが, 走幅跳の自己分析を通して過去

に履修した物理 (斜方投射) の数式を想起できたことから, キネマティックな分析フィードバックは, 理数学習と関連させた授業を企図できる可能性が示唆された.

附記

本研究は JSPS 科研費 JP17H07316 (スタートアップ支援) の助成を受けて行われた.

引用文献

- 東章弘, 西川宜仁, 奥山実男, 杉本亘之, 三谷千子, 加藤智江 (2004): パソコンによる動画および紙面資料を用いた水中歩行指導法が中年男女の運動強度の認識に与える影響. 日本生理人類学会誌, 9(3): 115-120
- Azuma A, Matsui K (2018): A method for evaluating jump skill using the speed-effectiveness index for the running long jump in PE class. *Bulletin of Hokuriku Society of Physical Education, Health and Sport Sciences*, 54: 7-13
- Azuma A, Matsui K (2019): Utilization of the speed-effectiveness index for evaluating the jump performance of female college students in a running-long jump PE class. *The Asian Journal of Kinesiology*, 21(2): 1-7
- Carlson R, Sheehan T, Boden P (2016): Video analysis of anterior cruciate ligament (ACL) injuries: A systematic review. *JBJS Reviews*, 4(11): e5
- Cooper LK, Rothstein AL (1981): Videotape replay and the learning of skills in open and closed environments. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 52(2): 191-199
- Fukking RG, Trienekens N, Kramer LJC (2011): Video feedback in education and training: putting learning in the picture. *Educational Psychology Review*, 23: 45-63
- 深代千之 (1983): 走幅跳と三段跳の Biomechanics. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 2(8): 600-613
- Gorman AJ, Willmott AP, Mullineaux DR (2019): The effects of concurrent biomechanical biofeedback on novel skill acquisition. *Sports Biomechanics*, 26: 1-15
- James PE (1971): Video feedback in learning beginning trampoline. *Perceptual and Motor Skills*, 32(2): 669-670
- Kelly H, Miltenberger RG (2016): Using video feedback to improve horseback-riding skills. *Journal of Applied Behavior Analysis*, 49(1): 138-147
- Macrae H (2003): Cycling with video feedback improves performance

- in untrained, but not in trained women. *Research in Sports Medicine*, 11(4): 261-276
- Mani S, Sharma S, Singh D (2018): Web Plot Digitizer Software: Can it be used to measure neck posture in clinical practice? *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 11: 86-87
- Matsui K, Azuma A (2018): A study on the optimal distance of approach-run for running long jump based on quadratic regression equation approximation using graphing calculator in PE class of the National Institute of Technology. *Bulletin of Hokuriku Society of Physical Education, Health and Sport Sciences*, 54: 1-7
- Matsui K, Azuma A (2019): Optimal distance of the long jump approach run calculated using quadratic regression equation approximation in female college students attending a physical education class. *The Asian Journal of Kinesiology*, 21(3): 31-36
- 文部科学省 (2018): 平成 30 年度 文部科学白書 .
http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpab201901/1420047.htm, (参照日 2019 年 9 月 1 日)
- Neufeld MM, Neufeld RW (1972): Use of video-tape feedback in swimming instruction with emotionally disturbed children. *Perceptual and Motor Skills*, 35(3): 992
- Rohleder J, Vogt T (2018): Teaching novices the handstand: A practical approach of different sport-specific feedback concepts on movement learning. *Science of Gymnastics Journal*, 10(1): 29-42
- Sewall LP, Reeve TG, Day TA (1988): Effect of concurrent visual feedback on acquisition of a weightlifting skill. *Perceptual and Motor Skills*, 67(3): 715-718
- 宍戸隆之, 橋元真央 (2019): 体育の授業における ICT を活用した実践研究 —持久走中の心拍数表示による効果—. *人間環境学研究*, 17(1): 45-50
- 坪井一洋 (1996): 走り幅跳びの踏切における最適角について . *日本応用数学会論文誌*, 6(4): 109-119
- Van Wieringen PC, Emmen HH, Bootsma RJ, Hoogesteger M, Whiting HT (1989): The effect of video-feedback on the learning of the tennis service by intermediate players. *Journal of Sports Sciences*, 7(2): 153-162
- Weir T, Connor S (2009): The use of digital video in physical education. *Technology, Pedagogy and Education*, 18(2): 155-171
- Wilson BD (2008): Development in video technology for coaching. *Sports Technology*, 1(1): 34-40

研究推進委員会

委員長 常光幸美 (物質工学科)
委員 安丸尚樹 (機械工学科)
山本幸男 (電気電子工学科)
荒川正和 (電気電子工学科)
波多浩昭 (電子情報工学科)
坂元知里 (物質工学科)
田安正茂 (環境都市工学科)
青木宏樹 (一般科目教室(自然科学系))
川畑弥生 (一般科目教室(人文社会科学系))

福井工業高等専門学校 研究紀要 自然科学・工学 第53号

令和元年12月25日 印刷

令和元年12月25日 発行

編集兼
発行者

福井工業高等専門学校

福井県鯖江市下司町
TEL (0778) 62-1111 (代)
FAX (0778) 62-2597

印刷所

(有)ワープロセンターHOPE

福井県越前市東千福町 21-4
TEL (0778) 24-1146
FAX (0778) 24-2339
