

JOURNAL OF TECHNOLOGICAL RESEARCHES

Society of Science and Engineering/Architecture and Environmental Design, Kanto Gakuin University

Vol. 64 March 2021



第 64 卷

関東学院大学理工/建築·環境学会

第 64 巻

(通巻111号)

目 次

-研究論文-

- 尾之上 さくら,佐々木 康,小口 岳史,飯村 彰,野口 翔,河田 亮,東 一善:食品添加物によるヒト小児由来 神経芽細胞腫細胞の形態学的変化…………………………1
- 北村 美一郎,境 裕莉,坂根 旭,積田 光,菊池 泰生, 南部 友輝:ミミズ古典的条件づけの分子メカニズムの解 明------7

CONTENTS

-Research Paper-

- Sakura ONOUE, Yasushi SASAKI, Takeshi OGUCHI, Akira IIMURA, Sho NOGUCHI, Akira KAWATA, Kazuyoshi HIGASHI: Morphological changes in human neuroblastoma-Yoshiichiro KITAMURA, Yuri SAKAI, Akira SAKANE, Hikaru TSUMITA, Taiki KIKUCHI, Yuki NANBU: Investigation of molecular mechanisms of associative learning of the earthworm Hiroshi NAKAJIMA: Precise measurement of rare element abundances in remnants of core-collapse supernova to understandings of its explosion mechanism11 Hiroshi NAKAJIMA, Hikari KASHIMURA: Development of signal processing electronics for X-ray CCD camera onboard the X-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM)17 Yasuro FUNAKI: On the theory of nuclear cluster structure23 Tomoyuki TAKADA, Shouta NAITOU, Yuu TAKANASH, Akio MOCHIDA, Shohei YAMAGUCHI, Akira HASHIMOTO, Tomoyasu HIRAMATSU, Kazunori MATSUI: Formation and Humidity Sensing Properties of CuO and Cu₂O Crystallites on Copper Surfaces Immersed in Aqueous Solutions of Yasushi SASAKI, Tsugito YAMASHITA: Effect of Electrode Compression on the Performance of Sealed Alkaline Storage Kentaro TAKAHASHI, Minato KAWAGUCHI: The effect of hydrogen inhalation on the biological functions of long-distance

-技術論文-

-研究ノート-

 -Technical Paper-

-Research Note-

1

食品添加物によるヒト小児由来神経芽細胞腫細胞の形態学的変化

尾之上 さくら^{*} 佐々木 康^{*} 小 口 岳 史^{**} 飯 村 彰^{***} 野 口 翔^{****} 河 田 亮^{******} 東 一 善^{******}

Morphological changes in human neuroblastoma-derived cells by food additives

by

Sakura ONOUE Yasushi SASAKI Takeshi OGUCHI Akira IIMURA Sho NOGUCHI Akira KAWATA Kazuyoshi HIGASHI

要 旨

従来から食品添加物による培養細胞の細胞活性への影響が報告されてきたが、その詳細な作用機序については不明な点が多い.また、食品添加物による培養細胞の形態学的変化についての報告も限られている.そこで本研究では、食品添加物の混合投与による培養細胞への影響を明らかにすることを目的として、ヒト小児由来神経芽細胞腫細胞の細胞表面の微細構造および細胞小器官の形態学的変化について調べた.その結果、食品添加物を混合投与した場合、短小化した粗面小胞体が核周囲部に散在し、ミトコンドリアは細胞質内で部分的に集中して存在していた.また、ミトコンドリアのクリステが不明瞭なものが多く観察された.以上の結果から、食品添加物を混合投与することによって、ヒト小児由来神経芽細胞腫細胞の形態変化が生じることが明らかとなった.また、ミトコンドリアおよび粗面小胞体の形態変化と、これまでに報告した細胞変性または細胞死、細胞突起の退縮や消失との関連性が推察された.

キーワード:ヒト小児由来神経芽細胞腫細胞,形態学的変化,細胞小器官

Abstract

Several reports described the effects of food additives on activities of cultured cells. However, the detailed mechanisms of such effects have not been clarified. Additionally, the number of reports on morphological changes in cultured cells treated with food additives is limited. Thus, in this study, morphological changes were investigated in human neuroblastoma-derived cells to which food additive compounds were treated, focusing particularly on the morphological changes of cell surface and organelles. By the incubation with multiple food additives, shortened rough endoplasmic reticulum disseminated around the nucleus and mitochondria with unclear cristae congregated in a limited area of cytoplasm were observed. These results indicated that the multiple food additives induced morphological changes in human neuroblastoma-derived cells. In addition, morphological changes in mitochondria and rough endoplasmic reticulum were suggested to be related with the cell degeneration, cell death, and decrease of number or disappearance of cell processes reported in our previous study.

Key Words: NB-1 cells, morphological change, cell organelles

* 関東学院大学·理工学部理工学科 ** 神奈川歯科大学·総合教育部 *** 神奈川歯科大学大学院·歯科形態学分野 **** 関東学院大学大学院·物質生命科学専攻 ***** 神奈川歯科大学大学院·神経組織発生学分野

2020年12月17日受理

1. 緒 言

食品添加物は,安全性と有効性が確認され使用基準が定め られているが,これらの基準は食品添加物を単独で使用した 場合で,複数の食品添加物を組み合わせて安全性試験を行い, 基準を定めることは難しい.

本研究者らは、ヒト小児由来神経芽細胞腫細胞(NB-1細 胞) に対する食品添加物の複合影響を明らかにすることを目 的として、合成甘味料、着色料、発色剤、保存料の4種類を NB-1細胞に混合投与した場合の突起伸長への影響、細胞変 性または細胞死、細胞の表面構造の変化について検討してき た. その結果, 食品添加物を投与しない条件で培養した対照 群と比較して、混合投与群では細胞生存率が統計学的有意に 低下することや、細胞突起が著しく減少することを明らかに した. さらに、突起の退縮あるいは消失が観察された細胞で は、多くの場合に細胞変性または細胞死が認められることを 報告した¹⁾.一方,細胞の表面構造の変化については,対照 群では細胞表面に小突起が多数観察され、紡錘状の細胞体か ら1本の太い突起と細い多数の突起が伸び、それらが隣接す る細胞間で接触する像を確認した。また、混合投与群では対 照群と比較して、細胞表面の小突起の数が減少し、細胞体か らの太い突起は残存するが、細い突起が著しく減少すること を明らかにした. このように培養細胞に対する食品添加物の 複合影響についての報告は、本研究者らの報告を含めていく つかあるが^{2)~4)}, 食品添加物による細胞への作用機序につい ては不明であり、食品添加物を混合投与した際の細胞小器官 の形態変化についての報告も限られている.

そこで本研究では、食品添加物の混合投与による培養細胞 への影響を明らかにすることを目的として、NB-1細胞の細 胞表面の微細構造および細胞小器官の形態学的変化について 調べた。

Ⅱ. 材料と方法

1. 食品添加物

食品添加物は、食品添加物一日摂取量総点検調査報告書 (平成12年 厚生労働省)の中で、1~6歳児が摂取している 食品添加物のうち摂取量が高いものを選定した.食品添加物 と投与濃度は、安息香酸ナトリウム5.09 mM、アスパルテー ム5.36 mM、タートラジン0.929 µM、亜硝酸ナトリウム1.59 mM である.各食品添加物の1日当たりの最大推定摂取量 (mg/日/人)*を培養液1 ml 中に混和し、細胞へ投与した.

注 釈

*:246種類の食品のうち年齢階層別に1日当たりの食品別平 均喫食量が算出され、これをもとに全国9ヵ所で食品が 購入された.それぞれの食品はホモジネートされ、100種 類の化合物(食品添加物の種類として281品目)の定量が 行われた.定量結果をもとに食品添加物の濃度が求めら れ、年齢層別の摂取量が算出された.

2. 培養細胞および培養方法

培養細胞は、神経分化のモデル細胞とされているヒト小 児由来神経芽細胞腫細胞、NB-1細胞を使用した。NB-1細胞 はマルチウェルプレートに5×10⁴ cells/well で播種し、45% RPMI1640 medium、45% Eagle's minimal essential medium に10%牛胎児血清(FBS)を含む培地を用いて37℃,5% CO₂,100%湿度下で24時間培養した。培養後のNB-1細胞 は、分化誘導物質である0.5 mM dibutyryl cyclic AMP (Enzo Life Sciences, Farmingdale, NY)で72時間処理した⁵⁾.位 相差顕微鏡による観察を行い NB-1細胞が分化したことを確 認した後、4種類の食品添加物を混合投与し、さらに48時 間培養した。これを混合投与群とし、分化誘導した NB-1細 胞に食品添加物を投与しない条件で48時間培養した細胞を 対照群とした。対照群および混合投与群について位相差顕微 鏡、走査電子顕微鏡および透過電子顕微鏡で観察するための 試料を作製した。

3. 位相差顕微鏡用試料作製

細胞は2.5% グルタルアルデヒド液 (pH 7.4, 0.1 M リン 酸緩衝液) で固定し, Coomassie Brilliant Blue (CBB) 染 色液で染色した後,位相差光学顕微鏡 (CKX31N-11BFK, OLYMPUS, Japan)を用いて細胞数および細胞突起の形状 について観察を行った.

4. 走查電子顕微鏡用試料作製

常法に従って、細胞を2.5%グルタルアルデヒド液 (pH 7.4, 0.1 M リン酸緩衝液) で30分間固定した後に、さらに1%オ スミウム酸液 (pH 7.4, 0.1 M リン酸緩衝液) で1時間後固 定を行った. 試料は、エタノールの上昇系列で脱水した後、 酢酸イソアミルを介して臨界点乾燥を行った. 臨界点乾燥し た後、イオンスパッタコーティング法で金コーティングして 走査電子顕微鏡用試料とした. 走査電子顕微鏡 (JSM6510, JEOL, Japan) を用いて、加速電圧5 kV, WD (Working Distance) 10 mm の条件で細胞表面の微細構造について 2次 電子像による観察を行った.

5. 透過電子顕微鏡用試料作製

本研究者らは、細胞小器官の形態変化を観察するために、 透過電子顕微鏡用試料の作製方法「カバーガラス法」を確立 させ報告してきた⁶⁾.本研究においても、このカバーガラス 法により透過電子顕微鏡用試料を作製した。細胞は2.5%グ ルタルアルデヒド液 (pH 7.4, 0.1 M リン酸緩衝液) で30分 間固定した後に、さらに1%オスミウム酸液 (pH 7.4, 0.1 M リン酸緩衝液) で1時間後固定を行った.試料は、エタノー ルの上昇系列で脱水した後に、酸化プロピレンに1時間浸漬 した.浸漬後、エポキシ系樹脂中に包埋し、重合器中で加熱 した.包埋した試料は、ミクロトームを用いてダイヤモンド ナイフで薄切した.薄切した切片は、銅メッシュ上に載せ、 酢酸ウラン液とクエン酸鉛液で二重染色した後に、透過電子 顕微鏡(JEM1220, JEOL, Japan)を用いて,加速電圧100 kVの条件で細胞小器官の形態学的変化について観察を行った.

Ⅲ. 結果

1. 位相差顕微鏡による観察

対照群では細胞から多数の突起が伸長し,突起を介して 細胞と細胞が同一焦点平面上で接触する像が観察された (Fig.1a). 混合投与群では対照群と比較した場合に,同一視 野における細胞数が減少した.また,細胞突起は著しく減少 し,細胞同士が互いに密着して塊状になった細胞が認められ た (Fig.1b).

2. 走査電子顕微鏡による細胞表面の微細構造の観察

対照群では、紡錘形をした細胞の表面に小突起が認められた.また、細胞体からは1本の太い突起と細い多数の突起が伸び、隣接する細胞間でそれらが接する像が認められた(Fig.2a).

混合投与群では、細胞表面の小突起は対照群と比較して少数であった.また、細胞体からの太い突起は認められたが、細い突起が著しく減少した.さらに、突起が消失あるいは退縮した細胞が、いくつか集まって塊状となった細胞が散在的に認められた(Fig.2b).

3. 透過電子顕微鏡による細胞小器官の観察

対照群では紡錘形をした細胞が認められ、細胞体には細胞 突起が認められた(Fig.3a-1).また、細胞内の核の形態変 化は認められず、細胞質にはミトコンドリアが均等に散在 し、クリステが確認された(Fig.3a-2).さらに、遊離リボ ゾームが多数存在し、その間には、粗面小胞体も観察された (Fig.3a-3).

一方,混合投与群では、円形をした細胞が多く見られ、これらの細胞では細胞突起が減少していた(Fig.3b-1).細胞内に占める核の割合は大きく、ミトコンドリアは細胞質内に部分的に集中して存在し、クリステ部分が不明瞭なものが観察された(Fig.3b-2).また、核周囲部には、短小化した粗面小胞体が観察された(Fig.3b-3).

Ⅳ. 考察

多くの食品に用いられている食品添加物は,科学的な知見 をもとに安全評価が行われ「無毒性量」や「1日摂取許容量 (ADI)」などが定められている.また,食品添加物のリスク 評価も行われ「食品添加物の指定可否」や「規格,基準など の決定」が行われている.

 $1 \sim 6$ 歳児が摂取している食品添加物で摂取量が高い食品 添加物について ADI をみると、安息香酸ナトリウム(安息 香酸) は $0 \sim 5 \text{ mg/kg/day}$, アスパルテームは $0 \sim 40 \text{ mg/kg/day}$, day, タートラジンは $0 \sim 7.5 \text{ mg/kg/day}$, 亜硝酸ナトリウム



Fig.1 Micrographs showing the effects of food additives on cells examined by phasephase-contrast microscope. (bar=10 µm) a. Cells of control experiment.

b. Cells treated with food additive compounds.



- Fig.2 Micrographs of scanning electron microscopy showing morphological changes of cells. (bar=10 µm)
 - a. Cells of control experiment: Cell processes were observed in many cells. These processes c ontacted with other cells.
 - b. Cells treated with food additive compounds: The number of thin and small processes on cell surface were decreased. Some round roundshaped cells with no cell processes grouped together.



- Fig.3 Micrographs of transmission electron microscopy showing cell organelles prepared by the cover glass method. (N: nucleus) a. Cells of control experiment.
 - a-1. The cells showed the spindle-shape and had many thin processes on the surface. The nucleus was located in the center of the cell.
 - a-2. The mitochondria with cristae were evenly distributed in the cytoplasm.
 - Mitochondria (🛶)
 - a-3. The rough endoplasmic reticulum and free ribosomes were observed in the cytoplasm.
 - Rough endoplasmic reticulum (►), Free ribosomes (▷)
 - b. Cells treated with food additive compounds.
 - b-1. The cells showed a round-shape with slightly thin processes on the surface. The nucleus occupied most of the cytoplasm.
 - b-2. The mitochondria with unclear cristae were observed in a limited area of the cytoplasm. Mitochondria ()
 - b-3. The shortened rough endoplasmic reticulum was observed around the nucleus. Shortened rough endoplasmic reticulum (▶)

は0~0.7 mg/kg/day となっている⁷⁾. しかし, 食品添加物は 単独で用いられることは少なく, いくつかを混合して用いら れることが多いが, 食品添加物を混合して使用した時の安全 基準は定められていない.

これまでに、私たちは食品添加物のうち安息香酸ナトリウ ム、アスパルテーム、タートラジン、亜硝酸ナトリウムを混 合して NB-1細胞に投与した場合の形態学的変化について位 相差顕微鏡、走査電子顕微鏡および蛍光顕微鏡を用いて観察 を行い、その結果を報告してきた¹⁾.また、これらの食品添 加物を単独で投与した場合と比べて、混合投与では細胞数が 減少することや、細胞突起の退縮や消失などの形態変化が顕 著に観察されることを明らかにした³⁾.しかし、細胞数の減 少や形態変化が生じる原因についての詳細は不明であったた め、その点を考慮して本研究では位相差顕微鏡、走査電子顕 微鏡に加えて、透過電子顕微鏡を用いて詳細な観察を行った. なお、透過電子顕微鏡用試料の作製は、本研究者らが考案し た「カバーガラス法」を用いて行った.従来の方法では、試 料の作製過程で細胞突起の消失が生じ、培養時と同じ状態の 細胞を観察することが困難であるためである.

分化した NB-1細胞に食品添加物を投与しない条件で48時 間培養した対照群を位相差顕微鏡で観察すると、細胞から突 起が伸長し、隣接する細胞間で突起同士が接しており、網工 (網目状構造)を形成していた.これらの構造を走査電子顕 微鏡で観察すると、細胞体からは多くの細い突起が観察され、 細い突起は培養容器の底面に沿って伸長していた.NB-1細 胞は付着細胞であるため、細胞突起を介して培養容器底面と の付着性を維持していることが考えらえる.

一方,混合投与群の NB-1細胞を位相差顕微鏡で観察する と,突起の数が著しく減少しており,さらに細胞数も減少し ていた.また,走査電子顕微鏡で観察すると,細胞から伸長 した太い突起は残存しているが,対照群で観察されたような 細い突起は減少あるいは消失していた.このように,混合投 与群では,NB-1細胞の細い突起が減少したことにより,培 養容器底面から剥離しやすくなり,結果として浮遊化し,細 胞数が減少したものと考察できる.

透過電子顕微鏡で観察すると、対照群の細胞周囲には小突 起が観察され、紡錘形をした細胞の中央部には核が位置し、 その周囲の細胞質内にはよく発達した粗面小胞体やミトコン ドリアが散在していた.

一方,混合投与群では、細胞周囲の小突起が著しく減少 し,核周囲部には短小化した粗面小胞体が散在していた.ま た,ミトコンドリアが細胞質内に部分的に集中して存在して おり,クリステが不明瞭なものが多く観察された.

以上の結果から、突起の減少は粗面小胞体の短小化や数の

減少と関連していると考えられる.また、ミトコンドリアが 集中して存在しているのは、細胞質の減少による可能性があ り、走査電子顕微鏡による観察で、核とその周囲部の細胞質 の間に明瞭な境界が認められたことも、前述の所見を裏付け ている.加えて、ミトコンドリアの損傷により細胞死が生じ たことは推測できるが、突起の減少による細胞の浮遊化と細 胞死との直接的な関係については不明である.

5

本研究では、食品添加物の混合投与による NB-1細胞の細 胞表面の微細構造および細胞小器官の形態学的変化について 調べた.本研究で認められたミトコンドリアおよび粗面小胞 体の形態変化は、これまでに報告した細胞変性または細胞死、 細胞突起の退縮や消失と関連があると考えられる.

参考文献

- 尾之上さくら、東一善、河田亮、佐々木康、高橋理:ヒ ト神経芽細胞腫由来細胞に対する食品添加物の複合影響、関東学院大学理工/建築・環境学会研究報告、58、 pp37-42 (2015).
- Budayová E.: Effects of sodium nitrite and potassium sorbate on in vitro cultured mammalian cells, Neoplasma., 32, pp341-350 (1985).
- 3) Lau K., McLean W.G., Williams D.P and Howard C.V.: Synergistic Interactions between Commonly Used Food Additives in a Developmental Neurotoxicity Test, Toxicological sciences., 90, pp178-187 (2006).
- 4) El-Wahab HM, Moram GS.: Toxic effects of some synthetic food colorants and/or flavor additives on male rats, Toxicol Ind Health., 29, pp224-232 (2013).
- 5) Ishikawa S.: Differentiation of human neuroblastoma cells in vitro-morphological changes induced by dibutyrl cyclic AMP, Acta Pathol Jpn., 27, pp697-711 (1977).
- 6)尾之上さくら、東一善、河田亮、佐々木康、小口岳史、 飯村彰、高橋理:NB-1細胞の透過型電子顕微鏡用試料 作製法の検討、関東学院大学理工/建築・環境学会研究 報告、61、pp25-30 (2018).
- 7)国立医薬品食品衛生研究所 安全情報部第3室2018年4 月25日作成 食品添加物 ADI リスト (http://www.nihs. go.jp/hse/food-info/chemical/link-fdad.html).
- 8)木内実咲,佐々木明郁,松井庸輔,穗坂暁秀,柏崎飛鳥, 北詰建,東一善,河田亮,高橋理,佐々木康,尾之上さ くら:ヒト神経芽細胞腫由来細胞に対する食品添加物の 影響,関東学院大学理工/建築・環境学会関東学院大学 理工学部研究発表講演論文集,pp114-115 (2014).

研究論文

7

ミミズ古典的条件づけの分子メカニズムの解明

北	村	美-	一郎 *
境		裕	莉 **
坂	根		旭*
積	\blacksquare		光 **
菊	池	泰	生*
南	部	友	輝 *

Investigation of molecular mechanisms of associative learning of the earthworm

by

Yoshiichiro KITAMURA Yuri SAKAI Akira SAKANE Hikaru TSUMITA Taiki KIKUCHI Yuki NANBU

Abstract

Molecular mechanisms of associative learning of the earthworm *Eisenia fetida* was investigated. Earthworms were conditioned by weak vibration as a conditioned stimulus (CS) and light as an unconditioned stimulus (US). The occurrence of a shrinking response upon exposure to the CS (score) increased with the number of paired training trials. Conditioned worms showed short-term memory retention for 3 h and also long-term memory retention for at least 72 h. Induction of long-term memory but short-term memory was blocked by 1 h cooling after conditioning. The influence of nitric oxide (NO) donor SNP or NO synthase inhibitor L-NAME on consolidation of short-time memory was also examined. Induction of short-term memory was blocked by treating with L-NAME and was slightly accelerated by treating with SNP. These results demonstrate that the short-term memory of the earthworm is dependent on NO signaling pathway.

Key Words: Associative Learning, Short-term Memory, Long-term Memory, Nitric Oxide (NO), Earthworm

1. はじめに

動物は,経験に基づいて学習・記憶し,行動を変化させる ことで環境に適応することができる.外環境への適応は,動 物によっては時に生命維持や種の保存にもつながり,大変重 要な機能であるといえる.学習・記憶といった脳の高次機能 は,神経回路ネットワークのはたらきによるものであるが, 脊椎動物の脳の神経細胞数は100~1000億個ともいわれ非常 に膨大であり,学習・記憶の分子メカニズムの解明は困難を 極める.一方,無脊椎動物は,脊椎動物に比べ,その神経構 造は比較的簡単で神経細胞数こそ少ないが,パブロフの犬で 知られるような古典的条件づけ(連合学習の一種)や,慣れ や感作といった非連合学習も成立することがわかっており¹¹, 学習・記憶の分子メカニズムを詳しく調べる上で有効な系で ある.

無脊椎動物であるミミズは,従来,体壁へのくり返し機械 刺激に対して慣れを起こすことが知られていたが、近年、光 と振動の組み合わせ刺激による古典的条件づけが成立するこ とも示され²⁾, 学習・記憶メカニズム解明のためのモデル動 物として注目が高まっている.また、ミミズの主要な神経系 である腹髄神経節の特徴として、一酸化窒素 (nitric oxide: NO) 産生系であることが挙げられる. ミミズ腹髄神経節では, 静止時に NO が定常的に産生され、神経活動依存的にナノ~ マイクロモルレベルの比較的高濃度の NO が、セロトニンに よって一過的に誘引されることが明らかになっており^{3),4)},さ らに電気生理実験の結果から、過剰な外因性 NO が腹髄神経 節の神経活動に抑制的に働くこともわかっている⁵⁾. これら のことから、ミミズの神経活動には NO 伝達経路が強く関与 しており、さらに慣れや古典的条件づけといった学習のメカ ニズムにも大きく関わることが予想される. そこで本研究で は、光と振動刺激による古典的条件づけの分子メカニズムを 詳しく調べるため、条件づけに対する NO 伝達経路関連薬の 影響を調べることを目的とした.

2 実験方法

2.1 条件づけ装置

ミミズの条件づけは、遮光カーテンで作製した簡易暗室 内で行った.ミミズの行動は暗視機能付きビデオカメラ (FDR-AX60, SONY) で録画し、カメラをモニター (EX-LD-2071TB-B2, IO DATA) に繋ぐことでリアルタイムで観 察できるようにした.プラスチックシャーレ (直径90 mm) の底面に振動モーター (FM34F, T.P.C) を1個取り付け、 これを4個用意して同時に4匹のミミズを学習できるよう にした (Fig.1).暗室内の上部に500 Wのフラッドランプ (PRF500WD, 岩崎電気) を取り付けた.



Fig.1 Experimental set-up for the classical conditioning of the earthworm

2.2 光と振動刺激による古典的条件づけ

全ての実験を通じて、環帯がはっきりと確認できる成 熟したシマミミズ(*Eisenia fetida*)を用いた.ミミズは 条件づけの10分前に暗室内のシャーレに入れ、環境に慣 らした.条件づけ群では、8秒間の振動刺激(条件刺激, conditioned stimulus: CS)と3秒間の光刺激(無条件刺激, unconditioned stimulus: US)を組み合わせた刺激(トレー ニング)を1分ごとに10回与え、これを1セッションとし て計3セッション行った(トレーニング1~3).また、振 動刺激と光刺激を同時に与えないランダム群、刺激を与えな いナイーブ群を用意し、条件づけ群と比較した(Fig.2).

トレーニングの前後には、テスト刺激として1分ごとに3 回、各8秒間の振動刺激を与えた(テスト1~4、Fig.3). 短期記憶の成立を確認するため、条件づけ終了後、ミミズは 暗室内で静置し、テスト4を行った時刻の3時間後にテスト 5を行った(Fig.3). このときシャーレ内に湿らせたキムタ オルを小さく切って敷き、乾燥しないように暗所で3時間保 存した.条件応答は、各テストのスコア(逃避行動を起こし た場合は1、起こさなかった場合は0)の合計(最大値3、 最小値0)で評価した.

ミミズの長期記憶を調べるため、短期記憶と同様に条件づけ群、ランダム群、ナイーブ群を用意した.テスト4の後、 24、48、72時間後の振動刺激に対する応答を調べた.ミミズを3時間以上保存する場合は暗所に静置し、乾燥しないようシャーレ内に土と共に入れ、その上に小さく切ったキムタオルを湿らせてかぶせた.

テスト4の終了後に,条件づけ後のミミズを冷蔵庫に1 時間入れ,低温で静置した群(Cooling (1 h))を用意し, 24時間後の振動刺激に対する応答を調べた.また,テスト 5を行う2時間前に冷蔵庫で1時間静置した群を用意した (Cooling (2 h)).

ミミズの短期記憶形成における NO の役割を調べるため, NO 合成酵素阻害剤 L-NAME および NO 放出薬ニトロプル シドナトリウム (SNP)を用いた.ミミズを L-NAME (最 終濃度1 mM),または,SNP (最終濃度1 mM)を含む生理 食塩水中で1時間静置した後,条件づけを行った.また,条 件づけ前に通常の生理食塩水に1時間静置したミミズを用意 し、これをコントロール群とした.







Fig.3 Training session

3. 結果および考察

3.1 古典的条件づけによる短期記憶の成立

条件づけ群ではトレーニングを重ねるごとにスコアは上昇 していき、3時間後のテスト5においても高い値のままで あった (n=8, Fig.4). なお、ランダム群、ナイーブ群にお いてはスコアの上昇が見られなかった (それぞれ n=8). こ れらのことから、古典的条件づけにより短期記憶が成立して いたと考えられる.

3.2 長期記憶の成立とその持続時間

条件づけ群ではトレーニングを重ねるごとにスコアは上昇 していき,72時間後まで高いスコアを保っていた (n=13, Fig.5). なお,ランダム群,ナイーブ群においてはスコアの 上昇が見られなかった (それぞれ n=8, data not shown). これらの結果から古典的条件づけにより,長期記憶が成立し ていたと考えられる.

アメフラシを用いた過去の実験では、条件刺激(CS)と して水管への接触刺激を、無条件刺激(US)として尾への 電気ショックを組み合わせて10回与えたところ、長期記憶 が成立していた⁶⁾. なお、この時の記憶の継続時間は5日間 ほどであった.本研究のミミズの古典的条件づけでは、光 と振動刺激を組み合わせた刺激を10回行うことで1回のト レーニングとし、合計3回のトレーニングを行った.もし1 回のアメフラシとミミズのトレーニングが同じ効果を持って いたとすると、ミミズの記憶は5~7日間程度継続するもの と推察される.

3.3 長期記憶に対する低温静置の影響

条件づけ後に1時間冷蔵庫で静置した群(Cooling (1 h), n=12)では、条件づけ群 (n=8)に比べて24時間後のテス ト5のスコア値が大きく下がっていた(Fig.6).これは条件 づけ直後の低温静置によって代謝が下がり、長期記憶のため の新規タンパク質合成が阻害されたためと思われる.

また, テスト5の2時間前に低温で静置した群 (Cooling (2 h)) では, テスト5のスコアの値が高く保たれていた (n= 12). これらの結果から,長期記憶のための新規タンパク質 合成は,条件づけ終了後1時間程度の間に行われているもの と考えられる.なお,本研究の結果は,過去のアクチノマイ シンDやアニソマイシンによるタンパク質合成阻害の結果²⁾ とよく一致している.

3.4 短期記憶成立における NO の役割

コントロール群では、トレーニングを重ねるごとにスコア が上昇し、条件づけ終了3時間後のテスト5においても高い 数値に保たれていた (n=11, Fig.7). SNP で処理した群では、 コントロール群に比べてテスト1~4においてはやや高いス コアを示していたものの、テスト5においてはコントロール 群よりやや低いレベルとなっていた (n=14). L-NAME で 処理した群については、トレーニングを重ねてもスコアが上 昇しなかった (n=20).



Fig.4 Short-time memory by classical conditioning



Fig.5 Memory retention time



Fig.6 Influence of cooling on long-term memory



Fig.7 Influence of SNP and L-NAME on short-term memory

4. 結言

光と振動刺激を用いた古典的条件づけにより、ミミズの短 期記憶と長期記憶が成立することを確認できた.長期記憶は 少なくとも3日間続き,条件づけ直後の低温静置による新規 タンパク質合成阻害により阻害されることがわかった.なお, この新規タンパク質合成は,条件づけ終了後1時間程度の間 に行われていることが推測される.

NO 合成酵素阻害剤 L-NAME を用いた実験結果から,NO 合成がミミズ短期記憶形成に必要であることが示された.今 後は長期記憶形成における NO の役割についても調べていく 必要があると考えている.これまでミミズの繰り返し体壁刺 激による慣れ学習では、NO 伝達経路の活性化が記憶成立に 必要であることがわかっている⁵⁾. これらの結果から、ミミ ズの記憶の成立には NO 伝達経路が広く関与することが示唆 される.

謝 辞

本研究の一部は2017年度 理工/建築・環境学会研究補助 費を受けたものである.ここに感謝の意を表す.

参考文献

- Pinsker, H., Kupfermann, I., Castellucci, V., and Kandel, E.: Habituation and dishabituation of the gill-withdrawal reflex in *Aplysia*, Science, 167, 3926, pp. 1740-1742, 1970.
- 2) Watanabe, H., Takaya, T., Ogawa, H., Kitamura, Y. and Oka, K.: Influence of mRNA and protein synthesis inhibitors on the long-term memory acquisition of classically conditioned earthworms, Neurobiol. Learn. Mem., 83, 2, pp. 151-157, 2005.
- 3) Kitamura, Y., Naganoma, Y., Horita, H., Tsuji, N., Shimizu, R., Ogawa, H. and Oka, K.: Visualization of nitric oxide production in the earthworm ventral nerve cord, Neurosci. Res., 40, 2, pp. 175-181, 2001.
- 4) Kitamura, Y., Naganoma, Y., Horita, H., Ogawa, H. and Oka, K.: Serotonin-induced nitric oxide production in the ventral nerve cord of the earthworm, *Eisenia fetida*, Neurosci. Res., 41, 2, pp. 129-134, 2001.
- Kitamura, Y., Souda, D. and Fujita, H.: Molecular mechanism of non-associative learning in earthworms, abstract of society for neuroscience annual meeting, 2019.
- Squire, L. and Kandel E.: Memory: From Mind to Molecules, Roberts & Co (2nd ed), 2008.

重量崩壊型超新星爆発機構の解明に向けた希少元素生成量の精密測定

中嶋 大*

Precise measurement of rare element abundances in remnants of core-collapse supernova to understandings of its explosion mechanism

by

Hiroshi NAKAJIMA

要 旨

Cassiopeia A は350年ほど前に起きた、重力崩壊型(CC:core-collapse)超新星爆発の残骸(SNR:supernova remnant)で、銀 河系内で熱輻射する SNR の中では最も明るく若い. この爆発の親星については多くの観測により理解が進んでいる. SNR 周辺 の光エコー観測からは、外層の水素をほとんど失った状態の赤色超巨星においてヘリウムコアが崩壊して爆発したと推定される (II b 型超新星).また⁴⁴Ti の崩壊ガンマ線観測からは、爆発時の対流不安定性に対する制限が得られた.しかし、CC 超新星の爆 発機構や、爆発における元素合成の詳細は未解明である.この理解のためには CC 超新星によって合成される核種のうち、内部に 落ち込む領域と外部にはじき飛ばされる領域の境界(mass cut)付近で生成される Fe 族元素の量や分布などが重要な鍵となる.そ こで我々は軟 X 線の分光性能に優れた「すざく」と、広帯域分光性能に優れた「NuSTAR」を用いて、過去最も光子統計に優れた 長時間観測データを合わせて分光解析した.その結果、Cassiopeia A からの熱的放射成分と非熱的放射成分の分離に成功し、爆発 噴出物内の高階電離した Ni の輝線を検出した.これは CC SNR では W49B に次ぐ2 例目の発見である.高階電離した Ni の質量は、 太陽質量の(2.0 ± 0.6) ×10³倍であった.これは CC 超新星爆発のモデルから想定される質量の半分程度である.このことから、 Ni の半分以上は衝撃波による加熱をまだ受けていないと推定される.また、観測された Cr、Fe、Ni の組成比は、約20倍から約25 倍の太陽質量の親星とする超新星元素合成モデルと矛盾しないが、Mn の組成比は矛盾している.その原因についても議論する.

キーワード:超新星残骸,重元素組成,X線

Abstract

Cassiopeia A is a gravitational collapse (CC: core-collapse) supernova remnant (SNR) that occurred about 350 years ago. It is one of the brightest and youngest SNR in the galaxy. Many observations have made the understanding of the parent star of this explosion better. From the light echo observations around the SNR, it is estimated that the helium core collapsed and exploded in the red supergiant star, which had almost lost hydrogen in the outer layer (Type II b supernova). In addition, ⁴⁴Ti decay gamma-ray observations put a limit on convective instability during an explosion. However, the details of the explosion mechanism of CC supernovae and the nucleosynthesis in the explosion are unknown. For this understanding, we need to measure the amount and distribution of Fe group elements generated near the boundary (mass cut) between the region that falls inside and the region that is repelled to the outside. We used "Suzaku", which has excellent soft X-ray spectral performance, and "NuSTAR", which has excellent wideband spectral performance, to perform spectroscopic analysis by combining long-term observation data with the best photon statistics in the past. As a result, we succeeded in separating the thermal and non-thermal radiation components from Cassiopeia A, and detected the emission lines of highly ionized Ni in the explosive ejecta. This is the second discovery in CC SNR after W49B. The mass of highly ionized Ni was $(2.0 \pm 0.6) \times 10^3$ times the mass of the Sun. This is about half the mass expected from the CC supernova explosion model. From this, it is estimated that more than half of Ni has not yet been heated by the shock wave. In addition, the observed composition ratios of Cr. Fe are consistent with the supernova nucleosynthesis model of the parent star with 20 to 25 solar mass, while that of Ni are not consistent. The reason of this discrepancy is also discussed.

Key Words: Supernova remnants, heavy ions abundance, X-rays

1. はじめに

「超新星爆発(SuperNova; SN)」とは、大質量の恒星あ るいは白色矮星が爆発する現象である.この大爆発により、 元の恒星の大部分が吹き飛ばされる.超新星爆発は1つの銀 河あたり、数十年に1回程度の割合で起きると推定されてお り、銀河系内の超新星爆発については過去の文献に記録が 残っているものもある.有名なものを上げると、SN1006、 SN1054(かに星雲)、SN1572(ティコの星)などがあり、 数字は発見年を示している.銀河系内で最後に観測された超 新星爆発は SN1604(ケプラーの星)である.

超新星爆発はエネルギースペクトルの様子によって、2種 類に大別される.可視光観測において、水素の吸収線(バ ルマー線)が確認されないものを I 型超新星,水素吸収線 が目立つものをⅡ型超新星と呼ぶ. 典型的なⅠ型超新星では ケイ素の吸収線が顕著であるが、観測例が増えるにつれて ケイ素の線が弱い I 型超新星が報告されてきた. そこで、典 型的なI型超新星はIa型とし、それ以外のものの中でヘリ ウム吸収線が見えるものは Ib型, ヘリウムの吸収線も見ら れないものはIc型と分類された. このうちⅡ型超新星は約 10M[®]以上の大質量星の中心コアが進化過程の最後に重力崩 壊(CC: core-collapse)を起こして生じると考えられてい る. この CC 超新星の爆発機構や、爆発における元素合成 の詳細は未解明な部分が多い.爆発後の残骸(超新星残骸: Supernova Remnant (SNR)) を X 線で観測することにより、 親星の内部に存在していた元素(爆発噴出物)を定量的に測 定することが可能であり、爆発直前の星内部の様子や爆発機 構を探るうえで有効である.

2. 観測対象

Cassiopeia A (Cas A) は、約350年前に起きた重力崩壊 型超新星爆発の残骸である^{1).2)}.可視光観測で検出された爆 発噴出物の速度分布により、地球からの距離は3.4kpc と考 えられる³⁾.地球近傍にあり若いため,これまで電波から赤 外線・可視光,X線・ガンマ線まで広い波長域で数多くの観 測が行われ,その形状や組成が詳細に解析されている.親星 の特性と超新星爆発,この両者について理解するうえで最適 な天体の一つと言える.

図1にCas AのX線画像を示す.空間分解能に優れたチャンドラ衛星のデータからは、鉄やシリコンの爆発噴出物が非対称に分布していることが分かる.鉄は親星内部の中心コア付近に存在する元素で、爆発機構を探るうえで重要な手掛かりとなるが、鉄のみでなく、クロムやニッケルなど、鉄族元素と呼ばれる複数の元素の存在比を相対的に探ることが本質的に重要である.そこで我々は分光性能にすぐれた日本の「すざく」衛星および広帯域分光性能に優れた「NuSTAR」衛星による観測データに注目した.図1 (右)に、すざく搭載X線CCDカメラXIS (X-ray Imaging Spectrometer)で得たX線画像を示す.

3. スペクトル解析結果

図2に、すざくおよび NuSTAR で得られた X 線スペクト ルを示す. 我々はこのデータを、⁴⁾ で示されていた Fe 元素 の Doppler shift 効果を加味しながらモデルフィットした. まず図2では、光学的に薄い電離非平衡のモデルでフィット した. その結果、プラズマ温度は3.2keV、電離パラメタ n_et (電子密度と、電離開始からの経過時間の積) は2.6×10¹¹ s/ cc と、電離平衡よりも十分に低階電離の状態であることが 分かった.

次に我々は、5-10keVの鉄輝線周辺に注目した(図3). 各輝線1本に対して Redshift する輝線(Red)と Blueshift する輝線(Blue)に分離することが想定されるため、それを Fe He α , He β , He γ , He δ にそれぞれ適応させた.その 結果 FeHe α の説明をすることはできたが、まだデータとの 残差が大きかった.そこでここに NiHe α , He β , He γ に相



図1: (左) Cas Aの X 線画像. NuSTAR で観測されたチタン44が青色で示されている. チャンドラ衛星で観測された鉄が赤色,ケイ素が 緑色で示されている. (NASA/JPL-Caltech/CXC/SAO). (左) 我々が本研究に用いた,すざく衛星 (XISO)の画像. 図中の緑の半径4.7 分角の円領域から X 線光子イベントを抽出した.



図2:すざく XIS0+3 (黒), XIS1 (赤), HXD (黄緑), NuSTAR (青) による X 線スペクトルデータを, プラズマモデルでモデルフィッ トした結果.用いたプラズマモデルは, べき乗の値があるエネルギーで変化する broken power-law の成分と, 電離非平衡 (nonequilibrium of ionization)の光学的に薄いプラズマが視線方向に運動することでドップラーシフトしたモデルを用いている.下のパ ネルは,モデルとデータの残差を示す.



図3:図2のスペクトルのうち、5-10keVの帯域を拡大した図.すざくXIS0+3(黒)、XIS1(赤)によるX線スペクトルデータを、XIS の応答関数を考慮した複数のガウス関数成分でモデルフィットした結果.高階電離した鉄(6.5-7keV付近に見える最も強度の高い輝線)からの輝線が複数存在する.このスペクトルにニッケルの輝線成分を考慮することで、データをよりよく表現することが分かった.

当する輝線をモデルに加えたところ,データをよりよく説明 できることが分かった. CasA からの Ni の検出は初めての ことであり, CC SNRでもW49Bに次ぐ2例目の発見である.

4.考察

Sukhbold らは、恒星が主系列星になった時点での質量 M_ ZAMS が9M⊙から120M⊙までの範囲について、1次元かつ 回転を考慮しない超新星爆発をシミュレーションし、爆発 的重元素合成で生成される重元素の質量を計算した.特に SN1987A と Crab nebula の特徴を再現するように較正され ている⁵⁾.そこから得られたデータを用いて Cr, MnFe, Ni の組成比を算出した.これを W18モデルと呼ぶ.W18モデ ルの計算結果と我々の観測データを比較することで、爆発時 の質量を推定した.結果を図4(左)に示す.観測データの 誤差が大きく、質量を高い精度で推定することは難しいが、 Mn の組成が小さいこと、さらに Ni の組成比が高いことが データの特徴であり、モデル線の中でその特徴を持つものは 20から25 Moである.よって、すざくと NuSTAR のデータ から、CasA が20-25 Moの M_ZAMS を持つ星が爆発したも のと推定できる.

次に、爆発モデルを議論するために各元素どれほどの質量 があるのかを見積もった.モデルフィットの直接的結果とし て得られる,高温プラズマ成分の強度(normalization)の計 算式は以下の通りである.

$$norm = \frac{10^{-14}}{4\pi [D_A(1+z)]^2} \int n_e n_H dV$$

ここで D_A は天体までの距離(cm), n_e は電子密度, n_H は 水素の密度,Vは超新星残骸の体積である。今,仮定として CassiopeiaAまでの距離を3.4kpc,赤方偏移z=0,超新星 残骸の形状を半径5光年の球とする。超新星残骸中の電子密 度と水素の密度はほぼ同じなので $n_e = n_H$ とする。これによ りプラズマ中の水素の数を求め、太陽組成から各元素の数お

よび質量を計算することができる. モデルから計算した Cr, Mn, Fe, Ni それぞれの最小値とそれぞれの解析結果から得 られた値の比を求めた結果が図4(右)である.結果として、 W18のモデルに対して Cr, Mn, Fe, Ni の検出量が有意に 低いことがわかった.また Cr, Fe, Ni は傾向としては似て いるが、高階電離した Ni の質量は、太陽質量の(2.0 ± 0.6) ×10³倍であり、これは CC 超新星爆発のモデルから想定さ れる質量の半分程度である. Mn だけ特に検出量が少ない. これは、親星の内部で生成されたこれらの元素が、まだ衝撃 波加熱を受けていない可能性が考えられる. Chevalier らは, 爆発噴出物と星周物質の相互作用をモデル化し、爆発噴出物 の多くが逆行衝撃波を通過しているとした⁶⁾. このモデルを Laming らがチャンドラ衛星のデータに対して適用したとこ ろ、衝撃波加熱を受けていない爆発噴出物の質量は高々0.3 太陽質量であると計算した.これは,爆発前の親星質量(4-6 太陽質量:⁷⁾)に比べて非常に少ない.しかし、親星の内部 に局在する元素に限れば、加熱を受けていない割合は大きく なると考えられる.また、最近の電波観測では、加熱を受け ていない噴出物が約2太陽質量あるという結果もある.

この考え方に基づくと、Cr,Mn,Fe,Niのうち、Mnだけ が、加熱を受けていない割合が高い.この原因は不明であ る.これらの元素のうち、Mnだけを選択的に内側に分布 させるような対流のパターンがあるとは考えにくい.また、 I a 型超新星残骸では、モデルと高階電離 Mnの存在量が矛 盾なく説明されていることから、プラズマモデル中の Mnの emissivity に大きな誤りがあるとも考えにくい.

ただし, 関連する観測的事実として, SN1987A の⁵⁵Fe 存 在量がモデル予想よりも大幅に小さいというチャンドラ衛星 の観測結果がある⁸⁾. ⁵⁵Fe は, Mn の唯一の安定同位体である ⁵⁵Mn の親核であり, ⁵⁵Co の電子捕獲(半減期17時間)で生成 され, さらに電子捕獲(半減期2.7年)で⁵⁵Mn に崩壊する.⁸⁰ によれば, A =55の同位体の合成量がモデルの予想よりも 小さいか, あるいは爆発前の親星内部での対流がモデルで予



図4: (左) W18モデルで予想される Cr, Mn, Fe, Niの組成比と、本研究で得られた組成比の比較. モデルで示されている, 複数の M_ ZAMS の計算を異なる色でプロットしている. (右) W18モデルで予想される Cr, Mn, Fe, Niの質量と解析から求められた Cr, Mn, Fe, Niの質量の比.

想するよりも規模が小さくなると,⁵⁵Feの量を説明できる 可能性がある.この⁵⁵Feの欠乏は,CasAのMn欠乏と関連 する可能性がある.

5. まとめ

本研究では、すざく衛星と NuSTAR 衛星を用いて超新星 残骸 Cassiopeia A を観測した.スペクトルフィットの結果、 現象論的モデル、プラズマモデルフィットの両方で高階電離 した Ni の輝線を有意に検出した.最も統計の良い XIS0+ 3, 1, HXD, NuSTAR の同時フィットで得られた各重元素 の組成比から、Cas A の親星の質量が20-25 M₀の範囲とな ることがわかった. さらにスペクトルフィットの結果から. Cr, Mn, Fe, Ni 各元素の質量を計算したところ、これらの 元素は爆発時に生成されると考えられる質量に対して30% ほどしか検出できていなかった. これは超新星爆発の逆行衝 撃波がまだ内核付近まで到達しておらず、内核付近の重元 素がまだ熱せられていないことを示唆している. さらに Cr, Mn, Fe, Ni の中でも特に Mn の検出量が少なく, その原因 はそもそも Mn が奇数番号の元素のため生成量が少ない、も しくは爆発前の親星のマスカット付近で Mn の層に現在の物 理モデルとは異なる挙動がある、もしくはそもそもの Mnの 親核である⁵⁵Feの元素が生成されていないなど様々な可能 性がある.

本研究では5-30keV のエネルギーバンドを中心に解析した ため、これらのことをより正確に求めるためにはより低エネ ルギー側の元素まで注目していく必要がある.

謝 辞

本研究は大阪大学の修士学生であった池山優樹氏と協力し て実施した.また本研究は、2018年度関東学院大学理工/ 建築・環境学会の研究補助費を受け実施された.この場にて、 御礼申し上げる.

参考文献

- Thorstensen, John R.; Fesen, Robert A.; van den Bergh, Sidney ,The Astronomical Journal, 2001, 122 297-307.
- Fesen, Robert A.; Hammell, Molly C.; Morse, Jon; Chevalier, Roger A.; Borkowski, Kazimierz J.; Dopita, Michael A.; Gerardy, Christopher L.; Lawrence, Stephen S.; Raymond, John C.; van den Bergh, Sidney, 2006, ApJ, 645, 283.
- Reed, Jeri E.; Hester, J. Jeff; Fabian, A. C.; Winkler, P. F., 1995, ApJ, 440, 706.
- DeLaney, Tracey; Rudnick, Lawrence; Stage, M. D.; Smith, J. D.; Isensee, Karl; Rho, Jeonghee; Allen, Glenn E.; Gomez, Haley; Kozasa, Takashi; Reach, William T.; Davis, J. E.; Houck, J. C., 2010, ApJ, 725, 2038.
- Sukhbold, Tuguldur; Ertl, T.; Woosley, S. E.; Brown, Justin M.; Janka, H.-T.,2016, ApJ, 821, 38.
- 6) Chevalier, Roger A.; Oishi, Jeffrey, 2003, ApJ, 593, 23.
- 7) Young, Patrick A.; Fryer, Chris L.; Hungerford, Aimee; Arnett, David; Rocke-feller, Gabriel; Timmes, F. X.; Voit, Benedict; Meakin, Casey; Eriksen, Kristoffer A., 2006, ApJ, 640, 891.
- 8) Leising, M. D., 2006, ApJ, 651, 1019.

次期 X線天文衛星 XRISM 搭載 X線 CCD カメラ信号処理回路の開発研究

 中嶋
 大*

 樫村
 晶*

Development of signal processing electronics for X-ray CCD camera onboard the X-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM)

by

Hiroshi NAKAJIMA Hikari KASHIMURA

要 旨

XRISM は2016年に運用を終了した「ひとみ」衛星の背景や研究をもとに高温プラズマの X 線精密分光撮像を通して,物質や エネルギーの流転を調べて天体の進化を解明していくミッションである.XRISM には,広視野撮像を目的とした CCD カメラ (Xtend)が搭載される.Xtendには,我々が独自に開発した ASIC((Application-Specific Integrated Circuit)特定用途向け集積回路) を用いるが,この ASIC は,「ひとみ」衛星で未使用だった部品を使用する予定である.そこで,長期保管を経たこの ASIC が XRISM に使用しても問題ないか調べることが今回の研究の目的である.ASIC に CCD の疑似信号を流す電気性能試験を行い, 作成された当時の性能と比べた.結果,性能の劣化は見られなかった.また,ASIC の入力信号の大きさと波高値の線形関係で あるゲインについて,その温度依存性を調べる較正試験を行った.結果,20℃で変化率が0.1%となり,温度による影響は非常 に小さいことが分かった.次に,CCD の較正試験を大阪大学で行った.CCD に ASIC を搭載したものに,数時間様々な線源を -100℃~-130℃の範囲で一週間当て続けた.数種類の線源のデータを取得したが,本研究では⁵⁵Fe の-110℃の7時間分のデー タを解析した.スペクトルの⁵⁵Fe の輝線から分解能が170eV @ 5.9keV となり,これは「ひとみ」衛星の結果より良い性能を示した. これにより Xtend の CCD カメラ部分のフライトモデル組み立てに移行する.

キーワード:X線, CCD, ASIC

Abstract

XRISM (X-ray Imaging and Spectroscopy Mission), a next X-ray astronomical satellite mission, will investigate the flow of matter and energy through X-ray high-resolution spectroscopic imaging of high temperature plasma and elucidate the evolution of celestial bodies based on the background and research of the "Hitomi" satellite, which was discontinued in 2016. XRISM is equipped with a CCD camera (Xtend) for wide-field imaging. For Xtend, we will use our proprietary ASIC (Application-Specific Integrated Circuit), for which we will use substitutes for the "Hitomi" satellite. Therefore, the purpose of this research is to investigate whether this ASIC, which has undergone long-term storage, can be used for XRISM. An electrical performance test was conducted in which a pseudo signal of CCD was passed through the ASIC, and the performance was compared with the performance at the time of Hitomi. As a result, no deterioration in performance was observed. In addition, a calibration test was conducted to investigate the temperature dependence of the gain, which is the linear relationship between the magnitude of the ASIC input signal and the peak value. The rate of change was 0.1% at Δ T of 20 °C, and it was found that the effect of temperature was very small. Next, a CCD calibration test was conducted at Osaka University. CCDs connected with the ASIC was exposed to various sources for several hours in the range of -100 ° C to -130 ° C for a week. We obtained data from several types of radiation sources. From the emission line of ⁵⁵Fe in the spectrum, the resolution was derived to be 170eV @ 5.9keV, which was better than the result of the "Hitomi" satellite. With this results we will shift to the flight model assembly of the CCD camera part of Xtend.

Key Words: X-rays, CCD, ASIC

*理工学部理工学科数物学系

1. はじめに

XRISMは、2022年度内の打ち上げを目標としている、 JAXA,NASA,国内外の大学が協力して開発している国際 X 線天文台計画であり、「ひとみ」衛星の代替機になる.「ひと み」衛星の運用での問題や初期観測で得た観測結果などをも とに、「ひとみ」衛星で達成できなかった目標や、物質やエ ネルギーの流転を調べて天体の進化を解明していく.

XRISM に搭載される Xtend (X 線 CCD カメラ) には, 独 自 に 開 発 し た ASIC (Application-Specific Integrated Circuit) 特定用途向け集積回路)を用いるが, この ASIC は, 「ひとみ」衛星で未使用だった部品を使用する予定である. この部品が XRISM に使用しても問題ないか調べることが今 回の研究の目的である.

第2章では XRISM に搭載する ASIC についての概要と保 管状態,性能試験について説明している.第3章では ASIC の温度変化による性能への影響について記述している.第4 章では XRISM に搭載する CCD の較正試験について述べて いる.第5章には本研究のまとめと XRISM の今後の動向に ついて記している.

2. ASIC 概要

Xtend に使用される X線 CCD はスマホのカメラやデジ カメなどと同じ動作原理である.序論にも記述した通り, Xtend に使用される ASIC¹⁾ は「ひとみ」衛星時に作成され たものの中で未使用だったものを使用する予定である.宇宙 からの入射 X線が CCD 内部で光電効果により信号電荷に変 換され,電荷数に応じたアナログ信号を出力する.出力され たアナログ信号は ASIC に伝送され,信号を処理する.信号 を処理する際により良い性能を出すために,ASIC は CCD の真下に直接接続して,お互いの距離を最小限に抑えている.

ASIC には3mm四方のベアチップが内蔵されている. こ のベアチップにはチャンネルと呼ばれている CCD から来た アナログ信号を処理する回路が4つ搭載されている(図1 左). 図1右に, ASIC の機能ブロック図を示す. CCD から のアナログ信号が来たとき,チャンネル内の増幅器で信号を 10倍にする. その時, DAC (Digital-Analog-Converter) で アナログ信号の信号レベルにオフセットを与える. その後, 各チャンネルに2ずつある ADC (Analog-Digital-Converter) でアナログ信号からデジタル信号に変換する²⁾. このデジタ ル信号は後段の FPGA (集積回路)で復号化される.通常, ASIC とはベアチップなどをパッケージに包んだものをい う.今回使用する予定である,「ひとみ」衛星で未使用だっ た ASIC は24素子あった.このうち1素子は破壊試験に使 用したため,候補となる ASIC は23素子になった.これら 23素子は「ひとみ」衛星から XRISM の計画が始まるまで温 湿度管理がされていないデシケーターに保管されていた.こ の23素子すべてに外観検査を行った結果,23素子のうち15 素子パッケージの一部にわずかな変色が見られた.この変色 は、パッケージのシーリングロウに含まれる銀 (Ag)と空 気中の硫黄 (S)が継続的に反応し続けて硫化銀 (Ag₂S) に なったものと考えられる.このパッケージの変色が内部のベ アチップの電気的性能に影響している可能性を調べるために 試験を行った.

外観検査で異常が見られなかった素子は9素子となり、こ の9素子が最終的なFM (Flight Model) 候補品となった. 残りの14素子は変色が見られたためFM 候補品から外れた. しかし、14素子の変色が見られた場所は、パッケージのシー リングロウ付けの部分だけであった.本試験で使用する試験 用回路基板と接続する部分などには変色が見られない.そ こで、変色した素子についても参考値として、FM 候補品 9素子と一緒にデータを取得することにした.試験方法は、 ASIC を試験用回路基板にセットし、CCD シミュレーター から ASIC に CCD の疑似信号を800ピクセル分入力し、入 力等価雑音、積分非線形性(INL, integral non-linearity) な どを評価する(図2左上).この時、ASIC には0~20keV 相当の信号を処理させる.

23素子すべてのデータをまとめたものを図2下に示す. 性能評価に用いた指標は、入力等価雑音、積分非線形性であ る.前者は、ASIC内部で発生した雑音がすべて入力で発生 したものとみなしたときの雑音であり、単位はµVである. 低いほど優れた雑音性能だといえる.後者は、ゲインの線形 関係が理想的な一次関数からどれだけずれているかの指標で ある.一次関数と実際のデータ点のずれの最大値を入力信号 範囲で割り、パーセントで示す.こちらも、値が小さいほど 良い性能と言える.図を見ると、雑音、INLともに「ひとみ」 衛星(2013年)の時の結果とほぼ同じことが示されている³⁾. つまり、製造当時と性能の劣化が見受けられなかった.雑 音の32.7µV は電子数換算を行うと電子の数が6.5個となる.



図1:ASIC 内のベアチップ(左), CCD からの信号の処理過程(右).赤で囲っている部分が1チャンネル.





図2:ASIC をセットする試験用回路基板と電源(左上),800ピクセル分入力したときの出力波高値(右上).入力等価雑音(左下)とINL(右下)のデータと「ひとみ」衛星(2013年)時の結果.

一つの CCD に ASIC は二つ搭載されるので、それぞれの ASIC に信号を分岐し独立に処理させ平均をとることで、電 子数換算で電子の数が5個を切ることが分かった.天体から の X 線の代表例として鉄からの特性 X 線がある。そのエネ ルギーは約6keV である。その X 線が CCD 内部のシリコン 結晶で光電吸収されると、一対の電子正孔対を生成するのに 必要なエネルギーがおよそ3.65eV なので、6keV の X 線が 入射すると約1600個の信号電荷が生じることになる。上述 の電子数換算5個の雑音レベルは、信号電荷数に対して十分 低いといえる。これらの試験の結果より ASIC は XRISM に 使用しても問題ないと判断した。

3. ASIC の温度変化による性能への影響

ASIC の性能の中にゲインという指数がある.一般に ASIC の出力波高値と入力電圧の間には線形関係があるが, その比例定数がゲインである.ゲインが理想の値に近づけば 観測できる帯域が広くなる.しかし,ゲインは温度依存性を 持つことがわかっている. XRISM は高度約550km, 軌道傾 斜角30°の低高度地球周回軌道をとるため,一周回中に日照 と日陰を経験する. それに伴い,衛星内部や搭載機器の温度 も変動する. あらかじめ ASIC ゲインの温度依存性を地上で 測定しておき,打ち上げ後は軌道上で刻一刻と変化する温度 を記録する. 衛星の観測データに対して,各時刻におけるゲ インを適用することで,精度よく入力電圧を推定する. そこ で本試験では,この温度依存性がゲインにどれほどの影響が 出るか調べるために,素子温度によるゲインの変化率を地上 で観測した.

試験方法は,FM 候補品とならなかった14素子から無作為 に3素子を選出する.選出した素子を試験用回路基板にセッ トし恒温槽に入れる.その後,−20℃~+40℃の範囲で5℃ 刻みにデータを取得していく.

3素子の温度によるゲインの変化を図3に示す. 図をもと に温度によるゲインの変化率を算出した結果, 20℃の温度 変化でゲインの変化率は0.1%と非常に小さい値が出た. 実



図3:温度による ASIC のゲインの変化.

際のビデオボードの軌道上の温度は-10℃~+10℃と想定 されるので,本実験は十分カバーしているといえる.よって, ゲインの温度変化率によるデータへの影響はほぼないと判断 した.

4. XRISM に搭載する CCD の較正試験

FM 候補の ASIC と同様に FM 候補の CCD の較正試験を 行った. この X 線 CCD⁴⁾ は浜松ホトニクス社と Xtend チー ムとで共同開発したものであり, ピクセルサイズは24µm 四 方, 1280×1280ピクセルの撮像領域を持つ. Xtend ではこ の CCD4素子を田の字型に配置することで, 62mm 四方の焦 点面センサを形成する.本試験の目的は,地上で単色 X 線 に対する応答関数,主にスペクトル形状を精密に測定するこ とである. 天体のスペクトルは熱制動放射などによる連続 X 線と,特定の元素による線スペクトルで構成され,これらの 強度を正しく測定することが天体の理解には必須である. 応 答関数により,信号波高値分布から入射 X 線のエネルギー 分布に変換することが可能になる.

本試験は設備の都合上,大阪大学で行った.FM に用いられるものと全く同一の回路を持つ ASIC を FM 候補の CCD に接続して,24時間 CCD に数種類の線源を-100℃~-130℃の範囲で順番に当てていく作業を1週間続けた.

本試験で数種類の線源の数時間分のデータを取得したう ち,⁵⁵Feの-110℃の7時間分のデータの解析を行った.7 時間分のスペクトルを図4に示す.図の⁵⁵Feの輝線の分解 能を調べた結果,170eV(半値全幅)@5.9keVとなった.「ひ とみ」衛星の⁵⁵Feの分解能は179eV@5.9keV だったので,「ひ とみ」衛星よりも良い性能であることが分かった.



図4: XRISM Xtend フライトモデル用 CCD が観測した⁵⁵Fe のス ペクトル.

4. まとめ

本研究では、2022年度打ち上げ目標の XRISM に使用され る ASIC が2013年から湿度管理がされてないデシケーター で保管されていたため、ASIC のパッケージ部分に変色があ る素子が複数あることが分かり、それを XRISM に使用して も問題ないか試験を行った.変色がないものを FM 候補の 素子とし、変色がある素子も参考値としてデータを取得した. ASIC に疑似信号を流しデータを解析すると、2013年の試験 結果と比較すると性能の劣化が見られなかった.さらに、参 考値として取ったデータとも比較すると系統的な性能の劣化 が見られず、パッケージの変色は ASIC の性能に影響はない ことがわかった.よって「ひとみ」衛星の ASIC は XRISM に使用しても問題ないと判断した.

また、ASICにはゲインという指標があり、理想の値に近 づくほど観測できる帯域が広がる.そのゲインは温度依存性 があり、ASICの動作に影響がないか調べた.無作為に選ん だ3素子のゲインの変化率を調べると、20℃の温度変化で 変化率が0.1%と非常に小さい値となった.この値はゲイン の温度依存性による観測への影響はほぼないことを示した. この試験の結果は較正データベース化して,XRISMを扱う 世界の研究者に配布される.

次に、FMのCCDの較正試験を大阪大学で行った.FM に選ばれたASICと同等の性能の素子をCCDに搭載し、数 時間様々な線源を-100° \sim -130°Cの範囲で当て続ける作 業を1週間続けた.複数の線源のデータを取得したが、本 研究は⁵⁵Feの-110°Cの7時間分のデータを解析した.解 析したスペクトルの⁵⁵Feの輝線を調べると、分解能が 170eV@5.9keVとなった.これは「ひとみ」衛星より良い性 能を示した.

以上の結果により Xtend の CCD カメラ部分のフライトモ デル組み立てに移行している.

謝 辞

本研究は、2019年度関東学院大学理工/建築・環境学会の研究補助費を受け実施された.この場にて、御礼申し上げる.

参考文献

- H. Nakajima et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 632 (2011) 128-132.
- 2) H. Nakajima et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 731 (2013) 166–171.
- 3)藤川真里:次期X線天文衛星ASTRO-H 搭載用軟X線 撮像器(SXI)信号処理用ASICの性能評価,修士論文, 大阪大学大学院理学研究科(2011年度).
- H. Nakajima et al. Publications of the Astronomical Society of Japan 70, (2018) 21.

原子核クラスター構造についての理論研究

船木靖郎*

On the theory of nuclear cluster structure

by

Yasuro FUNAKI

要 旨

原子核クラスター構造について、歴史的観点から最近の発展までを概観する.まずアルファ粒子凝縮現象の予言とそれを記述 する模型波動関数が非常にうまく行くことを説明し、アルファ凝縮の概念が自然に拡張され、非局在型クラスター構造へと一般 化されること、それがあらゆるクラスター構造についても適用可能であるかを議論する.従来議論されてきたクラスターの空間 局在性と新たな概念である非局在性との競合、共存を、クラスター間パウリ排他律と模型波動関数に含まれるダイナミカルパラ メータに基づき明らかにする.更には「池田ダイヤグラム」によって示されるしきい値則に基づいたクラスター形成の道筋が、 構成クラスターを束縛する柔軟な「container」の発展の道筋ととらえ理解できることを示す.

Abstract

Nuclear cluster structure is discussed from its historical point of view to a new aspect developed recently. After a great success of a model wave function of alpha-particle condensation is explained, the picture of alpha-particle condensation is extended to a general concept of nonlocalized clustering, which is applicable to promisingly all the cluster structures. The competition between the localized and nonlocalized cluster motions is investigated in terms of the inter-cluster Pauli exclusion and dynamical character contained in a new wave function proposed recently. It is also shown that the path of cluster evolution, indicated by the Ikeda diagram with a threshold rule, can be described by the evolution of "container", which traps the constituent clusters in a flexible way.

1. はじめに

原子核は有限個の核子(陽子と中性子)が核力により自己 束縛した量子多体系である. その多くの基本的性質は、殻模 型に代表される核子の平均場構造によって良く理解されてき た.しかしながら同時に、特に軽い核においては、わずかな 励起エネルギーで劇的に構造を変え、あたかも液体中に結晶 が析出するかのように、複数の核子が集まりクラスター化し た状態が現れる. これがクラスター構造状態と呼ばれるもの で、現在では殻模型状態と並び、平均場とは全く性質が異な る原子核の基本的存在形態として知られている。このような サブユニットとしての核子集団の中で最も基本的なのはアル ファ粒子(陽子2個、中性子2個からなる⁴He 原子核)であ る. アルファ(以下α) 粒子はスピン・アイソスピンの飽和 した二重閉殻構造をしており、非常に安定である.また第一 励起状態に励起するのに20 MeV 程度の大きなエネルギーが 必要であり、非常に"固い". そのため原子核には、α粒子 によるクラスター化した状態が頻繁に現れる.特に質量数A =4nの自己共役核(nを自然数として陽子数,中性子数共に 2n)にはそのような α クラスター構造状態が存在し、それら は主に安定な基底状態ではなく、励起状態に出現する.

こうしたクラスター構造状態がどのような励起エネルギー 領域に現れ得るのかということについては、しきい値則と呼 ばれるものが知られている。クラスター構造状態が出現す るとすれば、それはそのクラスターに分解するしきいエネル ギー近傍に現れる、というものである。このことは逆に、励 起エネルギーがクラスターの分解しきい値程高くない場合に は、クラスター間の相関はそれほど弱くはなり得ず、クラス ターは溶解しその性質を失う、ということも意味している。 このしきい値則に従って自己共役4n 核にクラスター構造の出 現する様子を描いたのが Fig.1の池田ダイヤグラムである¹⁾.



Fig.1 池田ダイヤグラム¹⁾. カッコ内の数値は対応するクラスタ ーに分解する敷居エネルギー. 原子核が全てαクラスタ ー (〇印) に分解する様子が示されている. このダイヤグラムには,励起エネルギーの増大と共にどのようなクラスター構造が形成されるのか,という,クラスター 構造形成,発展の道筋が示されている²⁰.

例えば¹²Cでは、殻模型的構造を有した基底状態から出発し、 α クラスター間の相対自由度を励起することで3 α 分解しきい 値近傍に3 α クラスター構造状態が現れる.また¹⁶Oでは、基 底状態において、殻模型的構造に埋め込まれた¹²C - α 間相 対自由度を励起することで、¹²C + α 分解しきい値近傍に¹²C + α 構造状態が現れる.次に先ほどと同様¹²C の中の α クラ スター間相対自由度を励起することで3 α クラスターに分解 され、4 α 分解しきい値近傍に4 α クラスター状態が出現す る、ということになる.本論文では、このようなクラスター 構造形成発展のパスに対する新しい描像の提案を主眼として 議論する.

α凝縮状態

2.1 ホイル状態と3α凝縮状態

¹²Cにおいて, 励起エネルギー7.65 MeV のスピン・パリティ が $J^{\pi} = 0^{+}$ の励起状態は、ホイル状態として知られ、星の中 での炭素元素合成過程において決定的な役割を果たす特別な 状態である³⁾. このホイル状態は核構造の面からも古くから 多くの研究がなされ、殻模型では再現することのできない不 思議な状態とされた. 1950年代にはこの状態は3つのαク ラスターが直線状に並んだ状態(直線鎖状態)という考えが 森永によって提案されたが⁴⁾, 1970年~1980年にかけてなさ れたクラスター模型を用いた計算によってこの考えは完全に 否定された. そこでなされたのは、αクラスター模型に基づ いた、共鳴群法⁵⁾,生成座標法⁶⁾,あるいは直交条件模型⁷⁾, と呼ばれる模型計算であり、いずれの方法も核子間の有効2 体核力から出発し、αクラスターを仮定した上で、3つのα クラスター間の相対運動に関しての完全解を求めるものであ る. どの方法もアプローチの違いはあれ本質的に同じ解を与 え,観測されていた,束縛エネルギー,α崩壊幅,電磁遷移 確率等の実験データを見事に再現していた. そしてどの方法 で得られた波動関数も、局在化した α クラスターが直線鎖状 に並んだような構造ではなく、むしろ3つのαクラスターが 相対 S 波で緩く結びついた性質を示していた^{8),9),10)}.こう してその後20年間にわたり、ホイル状態は非常に良く発達 した3αクラスター構造を持つ、原子核クラスター構造の典 型例として認識され、その本質は十分理解されたと信じられ てきた.

そして、2000年代に入り大胆な提案がなされる. きっか けは核物質系におけるクラスター化現象の研究である. 対 称核物質において、飽和密度に対して低密度領域の性質を 調べていた P. Schuck と G. Röpke は、飽和密度の1/3程度 の低密度になると核物質中でαクラスターが析出し、更に はそのボソン統計性によりボーズ・アインシュタイン凝縮 状態へ相転移する可能性があることを示した¹¹⁾. 彼らは、A. Tohsaki, H. Horiuchi と共に、有限核においても類似の現象 が起こり得るかについての検討を始め、αクラスターが原子 核において一体場を形成しその最低エネルギー状態を占有す る、α凝縮というアイディアを提案した¹²⁾.これは従来のホ イル状態の理解を更新するだけでなく、一般のnα状態に対 する統一的解釈を提供する非常に魅力的なものである.この アイディアを体現するため、従来の有限核で用いられてきた クラスター模型に立脚した新たな凝縮型模型波動関数(以下 THSR(Tohsaki-Horiuchi-Schuck-Röpke)波動関数)が以 下のように提案された¹²⁾.

$$\Phi_{n\alpha}^{\text{THSR}}(B) \propto \mathcal{A}[\prod_{i=1}^{n} \Phi_{i}]$$
(1)

$$\Phi_i = \exp\left\{-\frac{2}{B^2}(X_i - X_{CM})^2\right\}\phi(\alpha_i).$$
(2)

ここで、 $\phi(\alpha_i)$ (*i* =1, 2, …, *n*) は α クラスターの内部波 動関数であり、

$$\phi(\alpha_i) = \exp\left\{-\frac{1}{8b^2} \sum_{l < m}^4 \left(r_{l+4(l-1)} - r_{m+4(l-1)}\right)^2\right\} \sigma_{\uparrow\downarrow} \tau_{\uparrow\downarrow} \qquad (3)$$

のように、調和振動子パラメータ b で表される空間0s 軌道 を4つの核子が占有する、としている. r は核子座標であり、 $\sigma_{1\downarrow\tau_{1\downarrow}}$ はそれぞれスピン・アイソスピン波動関数を表して いる.また、A は核子全体を反対称化する演算子、 $X_i = (r_{1+4} (i-1))$ +…+ $r_{4+4} (i-1)$)/4、 $X_{CM} = (r_1 + \dots + r_{4n})$ /4n つまり Xi は i 番 目の α クラスターの重心座標、 X_{CM} は有限形においては取り 除くべき全体の重心座標である.式(2) は i 番目 α クラスター の重心運動波動関数を示しており、式(1) は、パラメータ B がクラスター自身のサイズより十分大きい、つまり B ≫ b の場合には、反対称化演算子 A ≈ 1 と近似でき、従って α ク ラスター間の相関は無く、その一体場の中で同一軌道を占有 した配位を示す.

またパラメータBの値が大きくなればなるほど、その一

体ポテンシャルは緩いものとなり, αクラスターはよりガス 的配位に近づいていく.一方でB=bの時には,αクラスター の重心運動は核子のゼロ点振動と等しくなり,すべてのαク ラスターは溶解し,反対称化演算子Aにより核子一体場の 中に吸収される.そして基底状態の殻模型配位と一致する.

2003年¹²C に対し, αクラスター模型による従来の波動関数と, この新たな模型波動関数との比較検討がなされた. 従来の波動関数は, 例えば以下のような共鳴群法方程式(RGM 方程式)を解くことで得られたものである⁹.

 $\langle \phi(\alpha_1)\phi(\alpha_2)\phi(\alpha_3) | \hat{H} - E | \mathcal{A}[\phi(\alpha_1)\phi(\alpha_2)\phi(\alpha_3)\chi(s,t)] \rangle = 0$ (4) ここで \hat{H} は核子間二体有効核力を含むハミルトニアンであ り、s、t は 3 つの α クラスター間のヤコビ座標である.こ れは前述の通り、 α クラスター間の相対運動を仮定なく解く ものであり、共鳴群法の波動関数は、

またこれは同様に生成座標法によるホイル状態に対する解 とも完全に一致するものであった.このことはつまり、3 α クラスター間の相対運動を何の仮定なく解いた結果、その解 として得られる波動関数は式(1)のα凝縮型波動関数だと いうことである.これによりホイル状態では、式(1)で体 現されるようにαクラスターが一体場を形成し互いに弱く相 関したガスのような振舞いをし、全て同一の軌道を占有し た、α凝縮状態であることが決定的となった.この様子を図 Fig.2の概念図で示した.基底状態と、ホイル状態つまり3 α 凝縮状態、との間の励起と溶解が、核子当たりわずか1 MeV 程度のエネルギーのやり取りで行われていることが分かる. また、Fig.3に¹²Cにおける基底状態からホイル状態へと遷移 する電子非弾性散乱の形状因子の実験データとの比較を示し



Fig.2 ¹²Cの基底状態からホイル状態へのクラスター化の概念図.

25



「IG.S 非理性電子散乱の形状因子の実験」 うとの比較 差 底状態からホイル状態への遷移.

た.過去のクラスター模型波動関数と一致しているので当然 ではあるが,確かに実験データを見事に再現していることが 分かる.

2.2¹⁶O中に現れる4a凝縮状態

有限核でのα凝縮現象は、たかが数個のボーズ粒子による ものであり、例えば冷却原子系におけるボーズ・アインシュ タイン凝縮とはかけ離れた現象のように思える. ここでは ¹⁶O を例にとり冷却原子系との類似点と、有限個であるとい うこと以外の相違点について取り上げてみたい.¹⁶0の4α 分解しきい値は14.4 MeV であり、この励起エネルギー領域 までに存在する量子状態は、二重閉殻構造を持つ基底状態を 除き、ほぼαクラスター構造を持った状態であることが知ら れている. 例えば Fig.1で、7.16 MeV には¹²C+α分解しき い値があり、この周辺には色々な角運動量の部分波が結合し た複数¹²C+αクラスター状態が存在する.共鳴群法に対し, 核子のパウリ原理による反対称化を近似的に取り扱った方法 である直交条件模型を¹⁶Oに適用したところ、4α分解しき い値近傍まで,スピン・パリティJ^{*}=0⁺の状態が6つ得られ. 実験で得られているスペクトルとも一対一に対応し、観測さ れているα崩壊幅も良く再現されることが示された¹⁴⁾.

Fig.4にその6つの $J^{\pi}=0^+$ 状態における α クラスターの運動量分布を示した.これによると、唯一6番目 0^+ 状態(0_6^+ 状態)のみが,運動量ゼロの近傍に鋭いピークを持っており、残りの5つの 0^+ 状態にそのようなピークは見られない.つまり 0_6^+ 状態のみが特異な構造を持ち、4 α 凝縮状態となっていることを示している.これは冷却原子系のボーズ凝縮に見られるのと同様の特徴である.また実験では 0_6^+ 状態は4 α 分解しきい値の上0.7 MeV の位置に観測されており、これが4 α 凝縮状態の強力な候補であると言える.

一方で、この最低エネルギー状態は、原子核のスペクト ルの中では励起状態として現れることは大きな特徴である。 ¹⁶0 核の中ではクラスターが溶解した核子一体場的殻模型状



Fig.4 スピン・パリティJⁿ=0⁺状態における a クラスターの運 動量分布¹⁵⁾。基底状態(0⁺状態)から0⁺状態までの分布が 示してある。

態が最も低いエネルギー状態を占める.池田ダイヤグラムの しきい値則に従って,励起エネルギーはクラスターに分解す るのに費やされる.励起エネルギーの増大と共にクラスター の形成発展が進行し,最終的に全てが最小単位であるα粒子 に分解される.そしてそこがαクラスターのゼロエネルギー 状態に対応し,α凝縮状態はその近傍をめがけて出現する, ということになる.

3. 空間局在型クラスターと空間非局在型クラスター

3.1²⁰Neの¹⁶O+αクラスター構造

式(1)で表現されるクラスター状態はパラメータ B の値 が大きい場合,クラスター間の相関が非常に弱くあたかもガ スのような振舞いをする状態として記述される.実はこのよ うな,クラスターが非局在化したガス的状態はクラスター構 造の中では特別な存在であり、少数派である.従来知られて きたクラスター構造,例えば¹⁶O における¹²C+ a 構造や²⁰Ne における¹⁶O+ a 構造では、空間的に局在化するという点が 非常に重要である.このようなパリティ対称性を破るクラス ター構造の場合,数 MeV のかなり近いエネルギー領域に、 ほぼ縮退に近い状況で正負パリティの回転帯構造が生じるこ とが知られているが、両クラスターが互いに平衡点周りに局 在しており、互いに透過しないと仮定しないと、実験で観測 されている両回転帯間のエネルギー差は到底説明できない (Fig.5 参照)¹⁶⁾.

このような局在化したクラスター構造を表現する模型波動 関数は、 16 O+ α の2体クラスターを例にとると、

$$\Psi(R) = \mathcal{A}\left[\exp\left\{-\frac{8(\boldsymbol{r}-\boldsymbol{R})^2}{5b^2}\right\}\phi(\alpha)\phi(^{16}0)\right]$$
(6)

のように書ける¹⁷⁾.式(1) 同様, $\phi(\alpha)$ は α クラスターの 内部波動関数, ϕ (¹⁶O) は核子16個分の空間座標を含む¹⁶O の内部波動関数,rは2つのクラスター間の相対座標である. また2つのクラスターがz軸方向に距離 R だけシフトして いるとすると、R = (0, 0, R)のように取ることができる. これは、2つのクラスターが距離 R だけ離れた位置を平衡 点とし、その周りでせいぜい拡がり b の微小なゼロ点振動し ている、ということを示している.そして従来クラスター構 造というのはこのような模型を基本として理解されてきた. この模型波動関数に現れるパラメータは2つであり、b は各 クラスター内部を記述する殻模型のサイズパラメータであ り、クラスター自身のサイズに対応しているとして現象論的 に決定しておく.もう一方のシフトパラメータ R を変分パ ラメータとして採用する.この $\Psi(R)$ を試行関数とし、真の 波動関数を.

$$\Psi_{I^{\pi}}^{(\lambda)} = \sum_{i} f_{I^{\pi}}^{(\lambda)}(R_{i}) \hat{P}_{I^{\pi}} \Psi(R_{i})$$
(7)

と表現する.スピン・パリティ J^{π} の空間への射影演算子を $\hat{P}_{J^{\pi}}$ とした.系のハミルトニアンを \hat{H} とすると、レイリー -リッツの変分原理より、

$$\sum_{j} \left\langle \hat{P}_{j^{\pi}} \Psi(R_{i}) \middle| \hat{H} - E_{j^{\pi}}^{(\lambda)} \middle| \hat{P}_{j^{\pi}} \Psi(R_{j}) \middle\rangle f_{j^{\pi}}^{(\lambda)} (R_{j}) = 0$$
(8)

が得られる.この方法は生成座標法と呼ばれているもので, これに対応する共鳴群法の2体の方程式と同等の解を与える ことが知られている¹⁸⁾.つまり,この方法は2体クラスター 間の相対運動に対して完全解を与える.

これに対して,式(1)で考えたクラスター間の相対運動 は式(7)と異質である.現在の¹⁶O+αクラスターの問題に 即して式(1)に対応する波動関数を書き下せば,

$$\Phi^{\text{THSR}}(\boldsymbol{B}) = \mathcal{A}\left[\exp\left(-\frac{8x^2}{5B_x^2} - \frac{8y^2}{5B_y^2} - \frac{8z^2}{5B_z^2}\right)\phi(\alpha)\phi(^{16}0)\right]$$
(9)

となる¹⁹⁾. 式 (1) で, $\phi(\alpha) \rightarrow \phi({}^{16}\text{O})$ と置き換える他, パ ラメータBに非等方性 $B = (B_x = B_y, B_z)$ を導入し, 2ク ラスター間の相対座標で書き直すと式 (9) が得られる. こ の THSR 型波動関数においてはシフトパラメータはもはや 存在しない. つまり2つのクラスターが同じ位置を占めるそ の代わりに, パラメータ $|B|(\geq b)|$ によって, 各クラスター にはより大きなゼロ点振動が許容される. このような模型は 果たして有効であろうか ?

まず Fig.5に示すように,式(8)を解くことによって得ら れたエネルギースペクトルは実験で観測されたスペクトルを 非常によく再現する. さらに各々のJ^{*}の状態に対し,対応 する完全解の波動関数(7)と、ここで導入した式(9)の 模型波動関数(を同じスピン・パリティに射影し規格化した もの)とのオーバーラップの二乗値をパラメータ Bの関数 として計算した結果、その最大値はいずれの状態に対して も、なんとほぼ100%となった¹⁹⁾. つまり、ここでも2体の クラスター間相対運動を仮定なく解いた完全解は、式(9) の波動関数そのものになった、ということである. しかしな がらこの事実は、空間的局在化というクラスター構造に対す る従来の理解を本質的に覆すものである. クラスターは空間 局在などしていない、構成クラスターは、サイズパラメータ Bで特徴づけられる一体場、あるいはある種の「container」 の中を非局在的に運動している、というのが THSR 型波動 関数 (9) の示す描像である.

3.2 3a, 4a 直線鎖状態

空間的局在化したクラスター構造として知られてきたもの の別の例は, αクラスターが直線状に, 申刺し団子のように



Fig.5 ²⁰Neに¹⁶O+αクラスター正負回転帯が現れる様子,及び観測されているスペクトルとの比較.数字は非局在型模型波動関数と完全 解とのオーバーラップの二乗の最大値¹⁹.

並んだα直線鎖構造状態である。例えばホイル状態ではその 可能性が否定されたが、その上のエネルギー領域には3α直 線鎖的とされる状態が理論的に予言されており、実験でもそ の候補が観測されている。また¹⁶0 においても4α直線鎖構 造をした状態の回転帯の候補が17 MeV あたりの励起エネル ギー領域に観測されている。

このような直線鎖状態の理想的な状況を考え、完全に一次 元上での問題として捉えてみる.この場合も¹⁶0+αのとき と同様、クラスターが団子状に空間局在した描像は変更を余 儀なくされるであろうか?先ほどと同様に、シフトパラメー タを導入しαクラスターを一次元上に配置, その上でシフト パラメータに対して、式(8)と同様の生成座標法を用いて αクラスター間相対運動を一次元上でフルに解いた. その解 と式 (1) (2) の α 凝縮型波動関数 (において $B \rightarrow B = (B_r)$ = B_v, B_z)と非等方性を導入したもの)のオーバーラップ の二乗値を示したのが Table1である. 3α , 4α のどの角運 動量状態に対しても,93%以上の値となっている20).つまり、 結果は全く同様である. この場合もクラスターは串刺し団子 のように局在化したような描像は当てはまらない、このとき のパラメータ B の値は、一次元上での直線鎖構造というこ とを反映して、全て $B_z \gg B_x = B_y$ 、つまりz軸方向に大きく 伸びた値を取っている.これはあたかも、2軸方向に大きく 変形した、サイズパラメータ B で特徴づけられるポテンシャ ル中を, αクラスターが自由に, あたかもガスのように運動 している、という描像を与える.ちなみに生成座標法では3 α系、4α系でそれぞれ約100個、約300個の試行関数の一次 結合を取ってようやく表された解であることを付け加えてお く. それらが単に一つの試行関数でほぼ100 % 表現される、 ということは、この波動関数がいかに本質を突いていて実現 されている構造を如実に表現したものであるか、ということ を示している.

4. 空間局在性とパウリ原理

前節までで,従来の局在型クラスター構造状態と考えられ てきた状態が,実は非局在型の模型波動関数で非常に良く記 述される,ということを見てきた.それでは結局,これまで 常識とされてきた,クラスターが特定の空間位置に局在化し て存在するという描像は変更せざるを得ないのであろうか? そうであれば,そのような描像でしか説明できないはずの Fig.5で示したような正負パリティの回転帯構造の存在はど のように理解するべきであろうか?

この問いに答えるためのキーとなるのが、パウリ原理によ り核子間の反対称化を行う演算子 Aである.式(1)でパラ メータ $B \rightarrow b$, あるいは式(6) で $R \rightarrow 0$ の極限で, 模型に 含まれるすべての構成クラスターは空間的に同一の場所を占 めることになる. これは全ての核子が実質的に同一点回りの 同一の調和振動子の拡がりパラメータしを持つことに対応す る. これは殻模型的一体場に帰着されることを意味し、結局 反対称化演算子Aにより、核子の殻模型構造と厳密に一致 する、これは一般には、クラスター間の空間的重なりが大き い領域では、クラスター間の相対運動に関してパウリ原理に より強い制限を受けることを意味する.実際クラスター間相 対波動関数を調和振動子で展開すると、パウリ原理で許容さ れる最低量子数に満たない成分は現れない. この禁止される 成分を「パウリ禁止状態」と呼ぶ^{21),22)}.このことは、クラ スター間の重なりが段々大きくなるにつれクラスター間に斥 力芯を生むことになる. つまりこれはパウリ原理により生ず るいわば運動学的斥力芯である.実際⁸Beの基底状態では, この斥力芯が核力により生じる α クラスター間の引力相互作 用に打ち勝ち、準安定的に2αクラスター構造が実現されて いる. 仮にこの状態にもう一つ α クラスターが加われば. α クラスター間の引力相互作用がこの運動学的斥力芯に打ち勝 ち、3つのαクラスターの重なりが強まり、溶解して核子一 体場の殻模型構造が生じる.これが¹²Cの基底状態である²³⁾. ホイル状態ではこの基底状態に量子力学的に直交するという 条件が、さらに α クラスター間に運動学的斥力として働き、 再び3αクラスター構造を発展させる. つまりクラスター構 造とは核子間に起因するクラスター間の引力相互作用と、ク ラスター間相対運動に関して、パウリ禁止状態、及び殻模型 的構造を有した基底状態に直交するという条件に起因するク ラスター間の運動学的斥力芯との競合、あるいは競演により 生じる、と言ってよい.

Fig.6に、3α、4α直線鎖状態に対する THSR 型波動関数 を用いて計算した物体固有系での核子密度分布を示した.こ れを見ると、確かにαクラスターが空間局在しているように 見える.それと同時にハローのように遠方まで長く尾を引い た密度分布となっている.この様子は3α、4α直線鎖状態に ついて示したが、¹⁶O+αクラスター構造状態についても同 様である.当然 THSR 型波動関数を考えれば、この空間的 局在化は、完全にパウリ禁止状態に直交するという運動学的 条件から生じるものである.もしこの波動関数に反対称化演 算子*A*が無ければ、クラスターは全て全体の重心の位置で

Table1 一次元上での α クラスター間相対運動の完全解と変形 α 凝縮型波動関数とのオーバーラップの二乗の値. 各スピン・パリティ状態 (*Jⁿ*)に対して計算してある. どの状態に対しても*B_x*=*B_y*=*b*=1.35 fmである. *B_z*の単位はfm.

	$^{12}C(3 \alpha)$		$^{16}\mathrm{O}\left(4~lpha ight)$	
J^{π}	Max.	$(B_x = B_y, B_z)$	Max.	$(B_x = B_y, B_z)$
0+	0.987	(b, 7.3)	0.944	(b, 11.7)
2+	0.989	(b, 7.8)	0.942	(b, 12.0)
4+	0.981	(b, 9.4)	0.931	(b, 12.8)



Fig.6 変形 a 凝縮型波動関数を用いて計算した、3 a、4 a 直線 鎖状態の物体固定系から見た核子密度分布²⁰.

の存在確率を最大にしつつ運動することになるからである. 反対称化によってクラスターの重なり合いの強い部分の波動 関数の成分は削られることになり,それによって図に示すよ うなクラスターの局在化が生じているように見えることにな る.少なくともこのような局在性を,直感に従い式(6)の ようなシフトパラメータRによって表現することは意味を なさない.動力学的観点からは,そのTHSR型波動関数の 反対称化演算子を除いた部分が示すように,構成クラスター は,全体としてパラメータBで特徴づけられたサイズ及び 形のポテンシャル中を非局在的に運動している.

4. クラスター構造の発展形成と「container」のサイズ膨張

以上まで THSR 型波動関数が、α凝縮状態のようなガス 的クラスター状態を最適に記述するだけでなく、よりコンパ クトで幾何学的配置に近い空間局在したクラスター状態に対 してもベストな記述を与える、ということをいくつかの具体 例を取り挙げ見てきた. この際重要なのは、従来用いられて きた、クラスターを空間的に配置するシフトパラメータを採 用するのではなく、クラスターが運動する一体ポテンシャル のサイズ及び形を規定するパラメータ**B**を採用することで あった.パウリ原理によりクラスター間に働く運動学的斥力 芯の効果を除けば、動力学的には構成クラスターはそのポテ ンシャルの中を自由に運動している. このときのクラスター ポテンシャルは、核子一体場のようなスタティックなものと はだいぶ様子が違う.様々なクラスター構造の全体としての サイズ,形に対して,基底状態のような高密度領域から α ガ ス状態のような低密度領域まで、また球形に近いものから直 線鎖のような極端に変形した構造まで、変幻自在に変化し得 るものである.このような柔軟に形やサイズを変え得るポテ ンシャルは、あたかも構成クラスターを内包する [container] の如くである.パラメータ**B**によって定められる「container」 の中をクラスターが自由に運動する、という描像である.

この新たな描像を用いて, Fig.1の池田ダイヤグラムで表 現されるクラスターの形成発展を記述するとどのようになる であろうか.例として¹⁶Oを取り挙げ,以下のように式(1) を拡張した THSR 型波動関数を考えてみる.

$$\Phi_{4\alpha}^{ext.THSR}(\boldsymbol{B}) \propto \mathcal{A}\left[\prod_{i=1}^{4} \Phi_{i}\right]$$
$$\Phi_{i} = \exp\left[-\sum_{k=x,y,z} \frac{2}{B_{ik}^{2}} \{X_{ik} - (X_{\text{CM}})_{k}\}^{2}\right] \phi(\alpha_{i})$$

パラメータ $B_i = (B_{ix} = B_{iy}, B_{iz})$ と非等方性を入れ, $B_1 =$ $B_2 = B_3 \neq B_4$ とする. このとき最もコンパクトな状態、つま り|B_i|~b(i=1, 2, 3, 4)なら殻模型的構造を持った基 底状態を表現する.次に B_4 のみが異なる値を取る, $|B_i| \sim b(i)$ =1, 2, 3) かつ $|B_4| \ge b$ の場合, 1 つの α 粒子のみが励起 することを意味し、 $^{12}C + \alpha$ 構造が表現される. そして、 B_{μ} $\geq b$ (*i*=1, 2, 3) となると, ¹²C の部分が励起され3 α クラ スター構造が生じ、全体として4αクラスター構造が表現さ れる. このとき低密度の4αガスの中で、まず4α凝縮状態 が最低エネルギーの状態として実現され、これは全てのパラ メータの値が同一となる、 $|B_1| = |B_2| = |B_3| = |B_4| \gg b$ とし て表現される.この状態は2.2でも議論した0%状態に他な らない、これらに変形等のバリエーションも加え、実際の計 算でこの模型波動関数が、基底状態からいくつかの内部スピ ン・パリティを含む複数の¹²C+ α クラスター状態を経由し、 最終的に4つのαクラスターがガス上に同一軌道を占める4 α凝縮状態まできれいに再現することが示された²⁴⁾.

この様子を概念的に表現したものが Fig.7である. つま り,池田ダイヤグラムで議論されてきたクラスター構造の形 成,発展は、この新しい描像によると,核子飽和密度程度の コンパクトな基底状態に始まり,構成クラスターを内包する 「container」が励起エネルギーと共に変形を含め膨張してい くことによって記述される.その低密度極限がαクラスター ガスのα凝縮状態である.かくして,最初はクラスター構造 の中でも特別な状態として別格に扱われてきたα凝縮状態で あったが,従来のクラスター構造の見方を変え,クラスター の「container」描像とその膨張発展を考えることで,全て同 列のもとに位置づけ理解することが可能になった^{2), 15), 24)}.

5. まとめと今後の展望

本稿では α 凝縮状態に始まり,そこで提案された α クラス ターー体場中での空間非局在的運動形式が,従来議論されて きた空間局在したクラスター構造状態とどのように融合され 理解されるか,ということを中心に議論した.取り挙げたの はいくつかの典型的クラスター局在構造状態であるが,本稿 では取り挙げなかったその他のいくつかの例も,THSR 型



Fig.7¹⁶Oを例とした,クラスターを内包する「container」の膨張によるクラスター形成発展の様子.縦軸は励起エネルギーを示している.

模型波動関数で議論されている. A 粒子を含んだ, ${}^{\alpha}_{\Lambda}$ Be や ${}^{13}_{\Lambda}$ C 等の Λ ハイパー核の他^{25), 26)}, 9 Be, 10 Be, 9 B, 10 C といっ た非4n 核等である^{27), 28), 29)}. また3 α 凝縮状態であるホイル 状態よりさらに上の励起エネルギー領域に「container」 描 像を適用することで, 凝縮構造に限らない α クラスターガス のよりリッチな存在形式も明らかになっている^{30), 31)}. この 領域では最近実験でも α クラスターに関係していると考えら れる新しい量子状態が続々と発見されており^{32)~39)}, まさに α クラスターダイナミクスのフロンティア領域である. より 重い質量数領域でも、例えば²⁰Ne では、¹⁶O の0⁶₆状態, つま り4 α 凝縮状態を経由して α 崩壊するような新しい状態の存 在が最近の実験で報告されている^{40), 41)}. これはまさしく5 α 凝縮状態の候補であると考えられ, それを確かめるべくいく つかの理論計算が進められているところである.

最後に,従来,殻模型的構造を持った基底状態からクラス ター構造状態への構造変化という観点から議論されてきたク ラスター化現象であるが,本稿で導入した「container」描 像を通してこれを見ると,それは核子一体場からクラスター 一体場への相変化とも言うべきものである.しかしながら, これが核子間の相互作用から出発してどのようにクラスター 一体場へと変化するのか,等不明なことが沢山あるのが事実 であり,まだまだ本質論的理解の段階に至っているとは言い 難い. 今後の理論的発展, 深化が望まれるところである.

謝 辞

本研究は、2018年度理工/建築・環境学会研究補助費を 受けたものである.

参考文献

- K. Ikeda, N. Takigawa and H. Horiuchi, Prog. Theor. Phys. Suppl. Extra Num. 464 (1968).
- B. Zhou, Y. Funaki, H. Horiuchi, A. Tohsaki, Frontiers of Physics 15 (1), 14401 (2020).
- 3) F. Hoyle, Astrophys. J. Suppl. 1, 121 (1954).
- 4) H. Morinaga, Phys. Rev. 101, 254 (1956); Phys. Lett. 21, 78 (1966).
- 5) J. A. Wheeler, Phys. 52, 1083 (1937).
- 6) H. Margenau, Phys. Rev. 59, 37 (1941).
- 7) S. Saito, Prog. Theor. Phys. 40, 893 (1968); Prog. Toeor. Phys. 41, 705 (1969).
- 8) H. Horiuchi, Prog. Theor. Phys. 51, 1266 (1974); 53, 447 (1975).
- 9) Y. Fukushima, M. Kamimura, Suppl. J. Phys. Soc. Japan
 44, 225 (1977); M. Kamimura, Nucl. Phhys. A 351, 456 (1981).
- 10) E. Uegaki et al., Prog. Theor. Phys. 57, 1262 (1977) ;59, 1031 (1978).
- G. Röpke et al., Phys. Rev. Lett. 80, 3177 (1998) ; M. Beyer et al., Phys. Lett. B 488, 247 (2000).
- 12) A. Tohsaki et al., Phys. Rev. Lett. 87, 192501 (2001).
- 13) Y. Funaki et al., Phys. Rev. C 67, 051306 (R) (2003).
- 14) Y. Funaki et al., Phys. Rev. Lett. 101, 082502 (2008).
- 15) Y. Funaki, H. Horiuchi and A. Tohsaki, Prog. Part. Nucl. Phys. 82, 78 (2015).
- 16) H. Horiuchi and K. Ikeda, Prog. Theor. Phys. 40, 277 (1968).
- 17) D. M. Brink, Proc. Int. School of Physics Enrico Ferm, Course 36, Varenna, ed. C. Bloch (Academic Press, New York, 1966).
- 18) H. Horiuchi, Prog. Theor. Phys. 43, 375 (1970).
- 19) B. Zhou et al., Phys. Rev. C 86, 014301 (2012); Phys. Rev. Lett. 110, 262501 (2013); Phys. Rev. C 89, 034319 (2014).
- 20) T. Suhara et al., Phys. Rev. Lett. 112, 062501 (2014).
- 21) K. Wildermuth and Th. Kanellopoulos, Nucl. Phys. 7, 150 (1958); 9, 449 (1958/59).
- 22) R. Tamagaki and H. Tanaka, Prog. Theor. Phys. 34, 191 (1965).
- 23) Y. Fujiwara et al., Suppl. Prog. Theor. Phys. 68, 29 (1980), and references therein.
- 24) Y. Funaki, Phys. Rev. C 97, 021304 (R) (2018).

- 25) Y. Funaki et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 113D01.
- 26) Y. Funaki et al., Phys. Lett. B 773, 336 (2017).
- 27) M. Lyu et al., Phys. Rev. C 91, 014313 (2015).
- 28) M. Lyu et al., Phys. Rev. C 93, 054308 (2016).
- 29) Q. Zhao et al., Phys. Rev. C 97, 054323 (2018).
- 30) Y. Funaki, Phys. Rev. C 92, 021302 (R) (2015) ; 94, 024344 (2016).
- 31) B. Zhou et al., Phys. Rev. C 94, 044319 (2016).
- 32) M. Itoh et al., Nucl. Phys. A 738, 268 (2004) ; Phys. Rev. C 84, 054308 (2011).
- 33) M. Freer et al., Phys. Rev. C 80, 041303 (R) (2009).

- 34) M. Freer et al., Phys. Rev. C 83, 034314 (2011).
- 35) D. J. Marín-Lámbarri et al., Phys. Rev. Lett. 113, 012502 (2014).
- 36) B. John et al., Phys. Rev. C 68, 014305 (2003).
- 37) H. O. U. Fynbo et al., Phys. Rev. Lett. 91, 082502 (2003) ; Nature (London) 433, 136 (2005).
- 38) C. Aa. Diget et al., Nucl. Phys. A 760, 3 (2005).
- 39) M. Itoh et al., J. Phys.: Conv. Ser. 436, 012006 (2013).
- 40) J. A. Swartz et al., Phys. Rev. C 91, 034317 (2015).
- 41) S. Adachi et al., arXiv: 2008. 01632.

33

N-イソプロピルアクリルアミドおよびアンモニアの水溶液に浸漬した 銅板表面における CuO および Cu₂O 微結晶の形成と湿度センサ特性

高	田	朋	幸 *
内	藤	翔	太 *
高	梨		優 *
持	\mathbb{H}	彰	男**
山	\square	祥	平 **
山 橋	口 本	祥	平 ** 晃 **
山 橋 平	口本松	祥 友	平 ** 晃 ** 康 *

Formation and Humidity Sensing Properties of CuO and Cu₂O Crystallites on Copper Surfaces Immersed in Aqueous Solutions of *N*-Isopropylacrylamide and Ammonia

by

Tomoyuki TAKADA Shouta NAITOU Yuu TAKANASHI Akio MOCHIDA Shohei YAMAGUCHI Akira HASHIMOTO Tomoyasu HIRAMATSU Kazunori MATSUI

要 旨

N-イソプロピルアクリルアミド (NIPAM) およびアンモニアの水溶液に銅板を浸漬すると,表面に CuO および Cu₂O 微結晶 が銅板表面に生成することを我々は報告している.本論文ではこれらの微結晶の生成に関するさらなる研究を行い,湿度センサ への利用を目的として電気抵抗に対する湿度の効果を評価した.相対湿度が10%から90%に増加すると,NIPAM 水溶液から生 成した Cu₂O/Cu の電気抵抗は7桁以上減少した.これらの結果から Cu₂O/Cu は湿度センサとしての利用が期待できる.

キーワード:銅表面,銅酸化物,アンモニア,N-イソプロピルアクリルアミド,湿度センサ

Abstract

We reported that CuO and Cu₂O crystallites are deposited on copper surfaces which are immersed in aqueous solutions of *N*-Isopropylacrylamide (NIPAM) and ammonia. In this paper we conducted further studies on the crystallites formation and the effect of humidity on the electrical properties of the copper surfaces in order to fabricate humidity sensors. The resistance of Cu₂O/Cu prepared in NIPAM decreased more than seven orders of magnitude when relative humidity increased from 10% to 90%. These results indicate that the Cu₂O/Cu can be used as efficient humidity sensors.

Key Words: copper surface, copper oxides, ammonia, N-isopropylacrylamide, humidity sensor
1. 緒 言

銅板をアンモニア水溶液中に浸漬すると水酸化銅 Cu (OH)₂ のナノリボンの配列構造(ナノリボンアレー)が生成する¹⁾. さらに Cu (OH)₂のナノリボンアレーを焼成して脱水すると, 酸化銅(II) CuO のナノリボンアレーが生成する¹⁾. CuO は 1.2 eV の狭いバンドギャップの p 型半導体で, 触媒²⁾ やセ ンサ³⁾ として用いられている.

酸化銅(I)(Cu₂O)はバンドギャップ2.17 eV を有する p 型半導体であり、リチウムイオン電池の電極⁴、ダイオード⁵、 光触媒⁶、触媒⁷、ガスセンサ⁸、湿度センサ^{9,10}など、多岐 にわたる応用が期待されている.Cu₂Oは立方体や八面体など の多面体、コアシェル粒子、ワイヤー、棒状など、さまざま なマイクロ・ナノ構造体の結晶形成が報告されている^{11)~13}.

我々は、アミド化合物の水溶液に銅板を浸漬することで、 銅板表面に自己組織化的に Cu (OH)₂・H₂O のナノシートが 花弁状構造体膜を形成することについて研究してきた^{14), 15}. その一連の研究過程の中で N-イソプロピルアクリルアミド (NIPAM)水溶液に銅板を浸漬すると、Cu₂O 結晶が生成す ることを見出した¹⁶⁾.またアンモニア水溶液中の銅板にお いては、大気中での浸漬では Cu (OH)₂のナノワイヤーが生 成するが、溶存酸素量とアンモニア濃度を調整することで、 Cu (OH)₂、CuO、Cu₂O の結晶を選択的に作製できることも 報告している¹⁷⁾.これらの作製法により、様々な形状の銅の 化合物を従来法より簡便に作製できることが期待される.

今回はこれらの知見に基づき,NIPAM およびアンモニア 水溶液中に浸漬した銅板上に生成する CuO および Cu₂O に 着目し,湿度センサに応用することを目途として研究した内 容を報告する.

2. 実験方法

7×7×0.2 mm³の銅板 (純度99.96%, ニラコ)を, エタノー ルおよび蒸留水でそれぞれ30分間超音波洗浄した後,水分 を直ちにふき取り実験に供した.NIPAM (≥98 wt%,和光 純薬)の0.1 M 水溶液4 mL を採取して50mL 容量のガラス 瓶に入れ,上記の銅板を浸漬した.容器はピンホールの開い たパラフィルムで蓋をして静置した(開放系).アンモニア 水溶液では,同様な手順で銅板を浸漬し,パラフィルムでピ ンホールを開けずに蓋をして密封静置した(密閉系).ここ でアンモニア水溶液での反応を密閉系で実施したのは,溶存 酸素量とアンモニア濃度を調整することで CuO, Cu₂O の結 晶が選択的に作製できるからである¹⁷⁾.約25 ℃で所定の期 間静置した後,銅板を蒸留水で洗浄して自然乾燥し,測定試 料とした.NIPAM 水溶液では3日間と7日間,アンモニア 水溶液では6日間それぞれ浸漬した.

浸漬した銅表面の生成物をX線回折装置RINT-2200 (XRD,リガク)で同定し,表面の状態を走査型電子顕微 鏡JSM-6510 (SEM,日本電子)で観察した. 試料銅板 をFig.1に示す電極に接続してLCRメータ6430B (Wayne Kerr)で,印加電圧0.5 Vおよび周波数20 Hz で銅板試料表 面の電気抵抗を測定した.感湿特性の測定には,飽和塩化ナトリウム水を入れたデシケータ(相対湿度10%)および恒温 恒湿槽(相対湿度30-90%)を使用した.

水溶液の分析には,紫外可視分光光度計 V-570(日本分 光),溶存酸素計 AS810(アズワン),pHメータ(堀場製作所) をそれぞれ用いた.

3. 結果と考察

3.1 NIPAM 水溶液中における銅板表面での結晶形成

NIPAM 水溶液に3日間以上浸漬すると銅板は均一に濃赤 褐色に変化した.3日間浸漬した銅板表面のXRDパターン (Fig.2)は,立方晶系酸化銅(I)Cu₂Oの(111),(110),(200) 面に由来するピーク(JCPDS#05-0667)を示した.

Fig.3に3日間浸漬した銅板表面のSEM像を示す.表面に 数 µm 程度の多面体の微結晶が密集して生成している.7日 間浸漬すると結晶がわずかに大きく成長していた.

3.2 アンモニア水溶液中における銅板表面での結晶形成

アンモニア水溶液に浸漬した銅板の色は、0.1Mでは暗 黒色、5および10 Mでは濃褐色を呈した.Fig.4に銅板の XRDパターンを示す.0.1 Mのアンモニア水溶液中に浸漬 した試料は、基板のCuの回折パターンのほかに単斜晶系 の酸化銅(II)CuOに由来するピーク(JCPDS#45-0937) を示していることから銅表面にCuO相が生成していること がわかる.5 Mおよび10 Mのアンモニア水溶液中に浸漬し



Fig.1 Photograph of the copper oxides/Cu humidity sensing device.



Fig.2 XRD pattern of the Cu plate immersed in an aqueous solution of NIPAM (0.1 M) for 3 d.

た試料には立方晶系酸化銅(I) Cu₂O に由来するピーク (JCPDS#05-0667) が現れ, Cu₂O が表面の主結晶相である ことを示している. 一般的に CuO と Cu₂O は, それぞれ黒 色および赤褐色を示すので, 浸漬した銅板表面の色はこれら の特徴と一致している.

Fig.5から **Fig.7**に各濃度のアンモニア水溶液中に6日間浸 漬した銅板表面の SEM 像を示す. **Fig.5**は, 0.1 M アンモニ ア水溶液中に浸漬した銅板表面の3000倍(a) および10000 倍(b)の SEM 像である.表面にはナノワイヤーが密集して, 数 μ m 程度の樹枝状構造を形成していた.

5 M では Fig.6に示すように,線状の溶解侵食が起こり, ナノワイヤーあるいはナノシートが表面に形成された.溶解 侵食は銅板の圧延方向に生じているため,しわ状の微小欠陥 (オイルピット)に由来しているものと推察される.10 M



Fig.3 SEM image of the Cu plate immersed in an aqueous solution of NPAM (0.1M) for 3 d.



Fig.4 XRD patterns of the Cu plates immersed in aqueous ammonia solutions for 3 d: (a) 0.1 M, (b) 5 M, and (c) 10 M.

(Fig.7) では,溶解侵食がさらに進んでクレーター状の欠陥 が多く観測された.その表面にはナノシートが集まって花弁 状構造体に成長している.これは NIPAM 水溶液中で形成さ れる多面体結晶とは明らかに異なっている.

3.3 銅板を浸漬したアンモニアおよび NIPAM 水溶液の 分析

アンモニア水溶液の色は、0.1 Mでは色が変化しなかった が、5 Mと10 Mでは青色に変化した.この青色の吸収スペ クトルは620-660 nm 付近にブロードなピークを示している ことから、 $[Cu(NH_3)_3(H_2O)_3]^{2+}$ および $[Cu(NH_3)_2(H_2O)_4]^{2+}$ のアンミン銅(II) 錯体構造が混在していると考えられる¹⁸⁾. なお錯体の表記として、 $Cu(NH_3)_n^{2+}$ またはアコ錯体である ことを明確にした $[Cu(NH_3)_n(H_2O)_{6-n}]^{2+}$ があるが、本稿で は参考論文の表記を尊重してそのまま記載した.**Table1**に 銅板を浸漬したアンモニア水溶液中のCu(II) 濃度、OH⁻⁻ 濃度,銅板の浸漬前と浸漬後の溶存酸素濃度を示す.Cu(II) 濃度は0.1 Mでは測定できなかったが、5.0 Mでは0.18 M、 10 Mでは0.26 M程度溶出していた.溶存酸素濃度は、0.1 Mでは1週間経過後には初期濃度の70%、5.0 Mでは25% に 減少した.これらの結果は、アンモニア水溶液中の銅から



Fig.5 SEM images of the Cu plate immersed in an aqueous solution of ammonia (0.1M) for 3 d at different magnifications,



Fig.6 SEM images of the Cu plate immersed in an aqueous solution of ammonia (5 M) for 6 d at different magnifications,



Fig.7 SEM images of the Cu plate immersed in an aqueous solution of ammonia (10 M) for 6 d at different magnifications.

Table I Concentrations of Cu (II), OH, and dissolved O_2 just prepared and after 7 d of cupper-immersed aqueous ammonia solutions.				
Aqueous ammonia solution	[Cu(II)]/M	$[OH^{-}]/M$	[Dissolved O_2 just prepared]/mM	[Dissolved O_2 after 7 d]/mM
0.1 M	a	$\sim 10^{-3}$	0.25	0.17
5.0 M	0.18	$\sim \! 10^{-2}$	0.20	0.05
10.0 M	0.26	$\sim \! 10^{-1}$	b	b

Table 1 Concentrations of Cu (II), OH⁻, and dissolved O₂ just prepared and after 7 d of cupper-immersed aqueous ammonia solution

a Undetectable

b Unmeasured

(3)

Cu(Ⅱ)を生成する反応は、アンモニア濃度が高いほど進行し、その反応で酸素が消費されることを示している.

他方0.1 MのNIPAM 水溶液は無色透明で,銅板を浸漬し て5日経過後も色の変化は見られなかった. NIPAM 水溶液 の濃度を1 M-10 M と濃くすると, NIPAM の吸収による 薄黄色になるが,その色は2週間経過しても変化しなかった.

3.4 銅板表面への CuO および Cu₂O 形成機構

アンモニア水溶液における溶存酸素による銅の溶解反応は 式(1)で説明されている^{19,20}.

 $Cu+1/2O_2+4NH_3+H_2O=Cu(NH_3)_4^{2+}+2OH^-$ (1) さらに銅の溶解は式 (2),式 (3) で示される自触媒反応によっ て促進されると考えられている^{19), 20)}.

$$\begin{aligned} &Cu+Cu(NH_{3})_{4}^{2+}=2Cu(NH_{3})_{2}^{+} \\ &4Cu(NH_{3})^{2+}+4NH_{3}+4NH_{4}^{+}+O_{2}=4Cu(NH_{3})_{4}^{2+}+2H_{2}O \end{aligned}$$

すなわち,上記は式(2)でCuとCu(Ⅱ)からCu(I)を 生成し,式(3)でさらにCu(I)からCu(Ⅱ)を再生して, 銅の溶解を自己触媒体にさらに促進するする反応であるが, それにはアンモニアと酸素が必要であることを示している.

このような反応で生成する $Cu(NH_3)_4^{2+}$ は、開放系のアン モニア水溶液中で OH⁻が置換して平面四角形の $Cu(OH)_4^{2-}$ となり、それが自己組織化的に凝集して $Cu(OH)_2$ ナノリボ ンを形成すると考えられている^{1)、21)}.

0.1 Mのアンモニア水溶液では, **Table 1**に示したように Cu(NH₃)₄²⁺あるいは一部が水と置換したCu(II)の状態 が観測されず,式(1)で示した銅の溶出に関与する酸素が 30%程度しか消費されていないことと良く対応している. アンモニア水溶液中において, NH₃濃度0.2 Mが以下でCuO 薄膜が銅表面に生成することから²¹⁾,今回の実験の0.1 Mの アンモニア水においても同様の機構でCuOを生成している ものと考えられる.

5 M および10 M のアンモニア水溶液中における Cu₂O の 生成機構は次のように推察している. ここでは酸素濃度の データがある5 M について議論する. 上記のテトラアンミン 銅(II) 錯体ではないが、ジアンミン銅(II) 錯体やトリア ンミン銅(II) 錯体などの Cu(II) が0.18 M 生成し、溶存 酸素濃度は75%消費されていることから、式(1) から式(3) に類似した銅の溶解反応が起きていると考えられる.しかし、 密閉系の反応では十分な酸素が供給されないので、式(3) のような Cu(I) が Cu(II) になる反応は抑制され、Cu(I) の状態が比較的安定に存在しうると推察される. これに OH⁻⁻⁻が置換して CuOH となり、脱水縮合反応により Cu₂O になると説明できる.しかしながらこれらの仮説を検証する には、表面分析等のさらなる研究が必要である.

また NIPAM 水溶液は濃度によって無色から薄黄色を呈して いるが、これは Cu(II)を形成しないで直接 Cu(I)を経て 速やかに Cu₂O 膜が表面析出していることを示唆している.こ の反応の解明にもまだ研究すべき点が多く残されている.



Fig.8 Relationship between resistance and relative humidity of cupper surface immersed in aqueous ammonia solutions and aqueous NIPAM solutions.

3.4 感湿特性

Fig.8にアンモニア水溶液および NIPAM 水溶液に浸漬し た銅板の電気抵抗と相対湿度の関係を示す.いずれも湿度が 高くなると抵抗値が小さくなる傾向を示した.CuO が表面 層である0.1 Mのアンモニア水溶液に浸漬した場合には1桁 しか抵抗値が変化しないのに対し、5 M および10 M で Cu₂O 層が表面に形成されると3 桁減少した.中でも5 M のものは 比較的直線性が良好である.NIPAM 水溶液に浸漬した場合 には、データ数は少ないものの7 桁から8 桁の大幅な減少を 示し、アンモニア水溶液の試料より優れた感湿特性を示した.

抵抗値が減少する機構としては、Cu₂O/Cu 表面に吸着す る水分子の影響,水分子によるプロトンキャリアの増加など が考えられる.同じ Cu₂O でもアンモニア水溶液と NIPAM 水溶液とで感湿特性が大きく異なっている.その説明として, 今回の実験結果から次のような仮説が考えられる.

Fig.2と Fig.4を比較するとアンモニア水溶液から作製した Cu₂O では(111)面が主に観測されるが,NIPAM 水溶液か ら作製した Cu₂O は(111)面の他に(200)面と(110)面 が成長していることがわかる.表面の銅原子のダングリング ボンドの数は,(110)面が(111)面のおおよそ1.5倍存在 しており,(110)面は(111)面の1.5倍ほど正電荷を帯びて いる⁷⁾.(200)面は表面に酸素原子が結合して表面電荷は中 性である.静電場は水の分解を促進してプロトンキャリヤが 生成しやすくなるので²²⁾,(110)面が成長した NIPAM から の Cu₂O は感湿特性が優れていると説明することができる. しかしながら,これ以外に結晶の表面形態の違い,さらには 格子欠陥の可能性も考えられ,これらの解明にはさらなる研 究が必要である.

4. 結 言

銅板を NIPAM 水溶液に浸漬して Cu₂O, アンモニア水溶 液に浸漬して CuO および Cu₂O を銅板表面に形成した. そ れらの銅酸化物膜が湿度センサへ利用できることを見出し た. これらの銅酸化膜の生成機構および感湿特性の解明は今 後の課題である.

References

- X. Wen, W. Zhang, and S. Yang, Langmuir, 19, 5898-5903 (2003).
- 2) J. B. Reitz and E. I. Solomon, J. Am. Chem. Soc. 120, 11467-11478 (1998).
- 3) T. Ishihara, M. Higuchi, T. Takagi, M. Ito, H. Nishiguchi, and Y. Takita, J. Mater. Chem., 8, 2037-2042 (1998).
- 4) D. Liu, Z. Yang, P. Wang, F. Li, D. Wang, and D. He, Nanoscale, 5, 1917-1921 (2013).
- 5) K. Kwak, K. Cho, and S. Kim, J. Nanosci. Nanotechnol., 13, 3433-3436 (2013).
- 6) C. -H. Kuo and M. H. Huang, J. Phys. Chem. C, 112 18355-18360 (2008).
- 7) W. -C. Huang, L. -M. Lyu, Y. -C. Yang, and M. H. Huang, J. Am. Chem. Soc., 134, 1261-1267 (2012).
- H. Shi, K. Yu, F. Sun, and Z. Zhu, CrystEngComm., 14, 278-285 (2012).
- 9) C.-L. Hsu, J-Y. Tsai, and T.-J. Hsueh, Sensors and Actuators B: Chemical, 224, 95-102 (2016).
- 10) Kh. S. Karimov, M. Saleem, Z. M. Karieva, A. Mateen1, M. T. S. Chanil and Q. Zafar, J. Semiconductors, 33, 073001/1-073001/5 (2012).

- 11) C. -H. Kuo, M. H. Huang, Nano Today, 5, 106-116 (2010).
- 12) J. -Y. Ho, M. H. Huang, J. Phys. Chem. C, 113, 14159-14164 (2009).
- 13) K. X. Yao, X. M. Yin, T. H. Wang, H. C. Zeng, J. Am. Chem. Soc., 132, 6131-6144 (2010).
- 14) H. Seshita, A. Mochida, A. Shida, and K. Matsui, Trans. Mat. Res. Soc. Jpn., 38, 313-315 (2013).
- 15) 持田彰男, 松井和則, 表面技術65, 489-494 (2014).
- 16) A. Mochida and K. Matsui, 平成27年 電気学会電子・情報・ システム部門大会, Symposium on Highly-ControlledNanoand Micro-Scale Functional Surface Structure and Smart Materials, OS3-1,pp.629-631 (2015).
- 17) 内藤翔太,足立淳人,高梨優,持田彰男,松井和則,日本材料科学会主催第4回 表面・界面のメゾスコピックサイエンスとプロセッシング研究会 講演会予稿集 P17, pp.56-57 (2016).
- 18) F. A. Cotton and G. Wilkinson, Advanced Inorganic Chemistry Fifth Edition, pp769-770, WILEY INTERSCIENCE (1988).
- 19) 真嶋宏,仁後悟,平藤哲司,粟倉泰弘,岩井正雄,資源 と素材109. 191-194 (1993).
- 20) 周康根, 真目薫, 姉崎正治, 資源と素材111, 49-53 (1995).
- 21) C. Lu, L. Qi, J. Yang, D. Zhang, N. Wu, and J. Ma, J. Phys. Chem. B, 108, 17825-17831 (2004).
- 22) J. Xu, K. Yu1, J. Wu, D. Shang, L. Li, Y. Xu, and Z. Zhu, J. Phys. D: Appl. Phys., 42, 075417 (7pp) (2009).

研究論文

密閉型アルカリ二次電池の性能におよぼす電池構成圧の影響

佐々木康*山下嗣人**

Effect of Electrode Compression on the Performance of Sealed Alkaline Storage Cell

by

Yasushi SASAKI Tsugito YAMASHITA

要 旨

充電終期のガス圧が0.1MPa あるいはそれ以下に保たれた,酸素サイクル機構を用いる密閉型アルカリ二次電池の開発のため に,容量ならびに耐久性におよぼす電解液量および電極圧縮の影響が検討された.電極圧縮は主にストレンゲージにより測定さ れた.電極群の最適電解液量は,4-AH 密閉型 Ni-Cd 電池の電極圧縮を変化させた予備実験によって決定された.次に,4種類 の密閉型 Ni-Cd 電池が,0.05MPa,0.2MPa,0.5MPa および0.8MPa の電極圧縮で構成された.充放電サイクル試験が実施され, ガス圧と容量の変化が測定された.より高い圧縮によって作られた電池は,サイクルの反復の増加とともに容量が低下する傾向 を示した.圧縮圧0.05MPa で構成された電池は,サイクル後,初期値とほぼ等しい容量を維持した.

キーワード:アルカリ二次電池,電極構成圧,電解液量,ガス圧力

Abstract

The effects of electrolyte volume and electrode compression on capacity and durability were studied in order to develop sealed alkaline storage cells using an oxygen cycle system in which gas pressure at the end of charge was kept at 0.1MPa or less. Electrode compression was measured mainly by strain gauge. The optimum amount of electrolyte for an electrode stack was decided by a preliminary experiment in which the electrode compression of a 4-AH sealed Ni-Cd cell was varied. Then four kinds of sealed Ni-Cd cells were constructed with electrode compression of 0.05MPa, 0.2MPa, 0.5MPa and 0.8MPa. A charge-discharge cycle test was performed, and changes in gas pressure and capacity were measured. Cells made by higher compression showed a tendency to decreased of capacity with an increase of cycle repetition. Cell constructed with a compressive pressure of 0.05MPa maintained a capacity approximately equal to the initial value after cycles.

Key Words: Sealed Alkaline Cell, Electrode Compression, Electrolyte Volume, Gas Pressure

1. 緒 言

充電時に発生する酸素を負極によって吸収させることを特 徴とする、いわゆる酸素サイクル方式による密閉型アルカリ 二次電池^{1).2)}は、容量が約5Ah以下の小型品を主な対象と して広く実用されている。しかし容量の大きい電池の場合は この方式による実用化が広くは普及していない。その原因の うちで主要なものは、発生ガスによる内圧上昇が大きいため に電池に要するコストが高くなる点であろう。

すなわち酸素サイクル方式による密閉型アルカリ二次電池 では、定格電流で充電しても温度その他の使用条件によって 変動するガス圧に耐えることができるように、一般に作動圧 が1MPa (10kg・cm⁻²) 程度の圧力安全弁を備えている.こ の作動圧が低いと安全弁の作動回数が増して電解液が減少 し、電池の性能を劣化させるおそれがある.しかし1MPa 程 度のガス圧は、小型電池であれば容器を円筒形とすることに よって困難な問題を生じることはないが、大容量の電池では 容器を円筒形とすると放熱の点で問題があろう.そこで容器 を角型とすれば放熱の点は改善されようが、反面に耐圧強度 の保持に難点が生じる.したがって大型電池の場合充電時 のガス圧を小型電池の場合よりもはるかに低く、たとえば 0.1MPa 以下に抑えることができれば実用化が促進されるよ うになるであろう.

電極群に含まれる以外の過剰な電解液を排除することに よって実現された酸素サイクル方式による密閉型アルカリ二 次電池の基本的な構成要因としては、電極とセパレータの性 能が重要であるが、小型密閉電池ではこの二者についての諸 要件はほぼ充足されているようである.すなわち現在電極は ニッケル極および水素吸蔵合金極あるいはカドミウム極のい ずれも、容量ならびに耐久力ともほとんど問題のない状態に まで到達しており、またセパレータも各種不織布が主要材料 として定着している.しかし大型の密閉電池で充電時のガス 圧を0.1MPa 程度以下に抑えたものを実用化するには、この 二つの要件の他に電極群の構成圧および電解液量が重要な条 件である.

電解液量と電極群の構成圧は相互に関連しながら密閉電池 の性能に影響を及ぼすものであり、この点について Lunn ら³⁾ は定性的に容器に挿入する電極群の厚さが増すほど、また電 解液量が多いほど充電時のガス圧上昇が大きいと述べてい る.しかしこの報告は容量との関連性については記載がされ ていない.また Turner ら⁴⁾ は電極群の構成圧が大きいほど ニッケル極で発生する酸素がカドミウム極に達するまでの経 路が短くなるため酸素の消費効率が高くなるとし、1.4MPa の構成圧を最適としているが、その他の構成圧ならびに電解 液量との関係については言及していない.

本研究はまず構成圧を種々に変えた実験用の密閉型ニッケ ル・カドミウム電池において,電解液量が容量および充電時 のガス圧に及ぼす影響を求め,それぞれの構成圧における最 適液量を定めた.次に電極群の構成圧を4通りに変えた,容 量が約4Ahの密閉電池を耐圧容器内に組立て,それぞれに 適量と考えられる電解液を添加し,容量およびガス圧の変化 を測定した結果について報告する.

2. 実験方法

2.1 電極群の加圧

電極群を0.05MPaから0.8MPaの圧力で加圧するには、 Fig.1に示す18-8ステンレス製金具によって行った.Fig.1の 金具(1)と(2)の間に電極群を挿入して(4)に示すよう に組立て、金具(1)の凹部に落としこんだばね板(3)の ボルトをトルクレンチで締付けることによって電極群を加圧 する.トルクと構成圧との関係はストレンゲージを用いてば ね板(3)に過重およびトルクが加わったときに生じるひず みを検知し、これを媒介として求めた.すなわちストレンゲー ジとして抵抗値120Ω、ゲージファクター1.98、ゲージ長さ 4mm、幅2mmの単軸ゲージをFig.1のばね板(3)の2か所 に固定し、初めにこの板に荷重を加えることによって生じる 歪みを測定し、荷重と歪との関係を求めた.歪みの値は2個 の平均値とした.

次にばね板(3)のボルトをトルクレンチで締付け、トル クと歪との関係を求めた. 歪の測定に当たっては再現性を考 慮して複数回反復した. 荷重と歪ならびにトルクと歪の関係 はいずれも良好な直線関係にあることが確かめられたので、 両者の関係より歪を消去し、電極群を加圧するために必要な 荷重(構成圧)とトルクの関係を求めるための実験式を得 た. 0.05MPaから0.8MPaまでの構成圧を精度良く測定する ため、Fig.1のばね板(3)は厚さ12mmおよび8mmの2種類 を用いた. この両者にたいして得られた実験式は Table1に 示すとおりである.

なお構成圧が0.01MPaの場合はこの装置では精度良く 測定することができなかったため、電極群に荷重3.8kg (0.01MPa)を加えたときの電極群の厚さを Fig.1の装置で組 み立てた場合に保持させるようにした.

2.2 電解液の注加による電極群構成圧の緩和

上記の方法で加圧されている乾燥状態の電極群に水あるい は電解液を注加すると、注加後時間の経過とともに構成圧が しだいに緩和され、やがて一定の値となる.この緩和程度は



Table 1 Experimental equations for load, compression pressure and torque as a function of strain (ε) Gage 1 and Gage 2 are fixed to component (3) in Fig.1
 (1) Thickness of component (3) in Fig.1 is 12mm

(1) mickness of component							
	Load, W/kg	Pressure, P/ $\times 10^{-1}$ MPa	Torque, T/ $\times 10^{-1}$ N·m				
Mean of Gage 1 & 2	$W = 0.497 \epsilon - 1.170$	$P = 0.014 \epsilon - 0.032$	$T = 0.074 \epsilon - 1.453$	T = 5.451P - 1.278			
(2) Thickness of component (3) in Fig.1 is 8mm							
	Load, W/kg	Pressure, P/ $\times 10^{-1}$ MPa	Torque, T/ $\times 10^{-1}$ N·m				
Mean of Gage 1 & 2	$W = 0.215 \epsilon - 1.017$	$P = 0.006 \epsilon - 0.027$	$T = 0.028 \epsilon - 1.995$	T = 4.583P - 1.876			

構成圧の大きさ,セパレータの枚数および電解液量などのパ ラメータによって変化するが,水と電解液との差はほとんど 認められなかった.そこでパラメータを種々に変えた場合, 主として水を注加したときの緩和減少について実験を行った.

2.3 密閉電池の構成と電池性能の評価

2.3.1 構成圧を変えた場合の最適電解液量

面積が50×70mmで厚さが0.7mmの焼結式ニッケル電極4 枚と、これと同一寸法の焼結式カドミウム電極5枚をFT系 ナイロン不織布で隔離し、カドミウム電極の両外側にも同不 織布を1枚ずつあてて電極群を構成した.開放液電池状態で 完全に充電したとき、ニッケル極は1.2Ah/枚であり、カド ミウム極はこれよりも約30%大きかった.ニッケル極の細 孔容積当たりの容量は0.47Ah・cm⁻³であった.

この電極群を用い,構成圧を0.01,0.07,0.2,および0.45MPa に変えた場合,充電時のガス圧が低く容量の比較的大きい液 量を求める目的で,それぞれに対し電解液を電極群を飽和 するのに必要な量の50~100%を加えた.電解液は6MKOH⁵⁰ にLiOH⁶⁰を飽和したものを用いた.電解液を加えた電極群 は内径6 cm で深さ14 cm の円筒状ステンレス製耐圧容器内に 吊るして密閉した.圧力測定は容器に取り付けてある圧力 ゲージによって行った.密閉後電流0.5A で完全に充電して からガス圧および容量を測定し,この操作を3回反復した.

2.3.2 サイクル用供試電池

次に同様な電極群4群(いずれも未化成)をFig.1に示 した金具を用いてそれぞれ0.05,0.2,0.5および0.8MPaに 加圧して,2.3.1の結果から最適液量と推定された13.6, 13.6,12.2および11.9cm³を加え,同様な耐圧容器に納めて 4種類の密閉電池を構成した.これらの電解液量は,構成圧 が0.05MPaの場合の13.6cm³は電極群を飽和するのに必要な 量の80%であり,他の三つの構成圧の場合はいずれも飽和 液量である.

この4個の供試電池を電流0.5A で端子電圧がほぼ一定と なるまで充電してから,30分静置後,電流1.0A で端子電圧 が1.0V になるまで放電して容量を求めた.容量測定を3回 反復し,2回目と3回目の容量がほぼ一定であることを確 認した後,充電電流を0.5A から0.7A まで,温度を0℃から 40℃まで,充電量を放電量に対し140% から450% まで変え て容量とガス圧の変化を測定した.

3. 結果と考察

3.1 電解液の注加による電極群構成圧の緩和

初めに構成圧が0.5MPaの場合,セパレータの枚数と構成 圧の緩和状況との関係を示すと Fig.2のとおりである. Fig.2 の歪み比とは乾燥状態の電極群を締付けたときの歪みに対す る蒸留水注加後の歪みの比であり,注水後の経過時間をパラ メータとして示した.緩和現象は注水後10⁴sec(約3h)後に ほぼ一定となった.本実験より供試電池をつくる場合に必要 とするセパレータが10枚のとき,初めの構成圧は注水後約 60%に緩和されていることがわかる.

次にセパレータの枚数が10枚の場合,構成圧と注水による構成圧の緩和状況との関係を示すとFig.3のとおりである. 構成圧が小さいほど緩和現象が大きく,構成圧が0.05MPa では注水後歪み比が0.3弱に,すなわち初めの構成圧が30% 弱にまで緩和されていることを示している.

次に実際の電解液を加えた場合,その量と各構成圧の緩和 状況との関係を示すと**Table2**のとおりである.この結果は 電解液を注加してから緩和が一定値となったときの構成圧 を,初めの構成圧に対する百分率で示したものであり,この 結果も構成圧が小さいほど,また電解液量が多いほど緩和の 程度が大きいことを示している.









3.2 構成圧を変えた場合の最適電解液量

結果は Table3に示すとおりである. 温度25±2℃,構成 圧が0.01および0.07MPa では電解液量が100% であると充電 時のガス圧は0.01MPa であった. この値は小さいけれども, 本実験に用いた耐圧容器では,電極群と密閉容器内のその周 囲の空間との容積比がおよそ1:1であり,実用電池ではこの 比率がはるかに小さくなるため,このような条件でのガス圧 は,はるかに大きな値となるであろう.また構成圧が0.01MPa の場合,電解液量は100% であっても80% であっても容量に はほとんど差が認められなかった.

構成圧が0.2および0.45MPa の場合は電解液量が100% で あっても充電時のガス圧はゼロであり,容量も開放液電池の 4.8Ah に対し83% および86% であったのでほぼ良好と考えら れる.

以上の結果より、サイクル用供試電池の電解液量は構成圧が0.05MPaの場合のみ電極群を飽和するのに必要な量の80%とし、構成圧が0.2、0.5および0.8MPaの場合はすべて100%とした.

3.3 サイクル用供試電池の性能

2.3.2に述べた条件で構成した4種類の供試電池について、充電時のガス圧および容量におよぼす充電電流、充電量および温度の影響を求めた結果はTable4に示すとおりである.

Table4より充電時のガス圧を低く抑えるためには構成 圧の低い方が有利であることがわかる.温度が25℃および 40℃の場合はガス圧はいずれも大きな値ではなく、25℃, 0.7A (約 c/5に相当)でも0.05MPa を超えることはなかった. しかし温度0℃で充電量が放電量の450%であった条件 No.6

 Table2
 Relaxation of cell assembly compression with addition of electrolyte

Electrolyte in cell	Cell assembly compression / MPa					
assembly	0.05	0.2	0.5	0.8		
100% (Saturated)	26	38	58	62		
80%	43	46	65	_		
60%	45	51	67	_		

The results are shown in percentage to initial compression pressure.

Table3	Effect of the amount of electrolyte on cell capacity and
	increase in gas pressure

<u> </u>			р
Cell assembly	Amount of	Capacity /	Pressure
compression /	electrolyte /	Ah	increase /
MPa	%	1111	MPa
	50	2.87	0
	60	3.92	0
0.01	70	4.12	0
	80	4.20	0
	100	4.21	0.01
	50	2.29	0
0.07	75	3.78	0
	100	3.98	0.01
	50	0.40	0
0.2	70	3.34	0
	100	3.91	0
0.45	75	3.89	0
0.43	100	4.11	0

ではガス圧上昇がかなり大きい.この条件における充電量と 端子電圧ならびにガス圧との関係を示すと **Fig.4**のとおりで ある.

構成圧が0.05および0.2MPaの場合,充電量が350%付近 よりほぼ一定値を示している.すなわちニッケル極における 酸素の発生とカドミウム極における消費とが平衡しているこ とを示している.しかし0.5と0.8MPaの場合は充電量が増す にしたがってガス圧は直線的に増加している.充電後放置す ると、構成圧が0.05と0.2MPaの電池のガス圧は数時間後に ゼロとなったが、0.5および0.8MPaの電池では40h以上経過 してもガス圧はゼロに戻らなかった.さらにこの2者の端子 電圧が充電終期で前2者よりも50mVほど高かったことを併 せて考えると、0.5および0.8MPaのように構成圧が高いとカ ドミウム極より水素が発生したものと考えられる.構成圧が 高いと正極で発生する酸素がセパレータの気孔を経由して負 極に至る拡散が困難となるため酸素消費反応が阻害されるの であろう.

カドミウム電極での酸化反応 Cd+2OH⁻⇒Cd(OH)₂+2e (1) および水素の酸化反応 H₂+2OH⁻⇒2H₂O+2e (2)

	Cell assembly compression / MPa									
No	0.	05	0	.2	0	.5	0	.8	Charging	Т
110.	Capacity / Ah	Gas press. / MPa	Capacity / Ah	Gas press. / MPa	Capacity / Ah	Gas press. / MPa	Capacity / Ah	Gas press. / MPa	Current /A	1 emp. ∕°C
1	3.88	0.01	3.75	0.01	3.79	0.03	3.90	0.02	0.5	25
2	3.79	0.01	3.56	0.01	3.70	0.03	3.71	0.02	0.6	25
3	3.82	0.03	3.55	0.02	3.78	0.05	3.72	0.04	0.7	25
4	3.36	0.01	3.09	0.01	3.27	0.02	3.31	0.01	0.5	40
5	3.99	0.00	3.73	0.00	3.95	0.02	3.59	0.01	0.5	0
6	4.56	0.06	4.27	0.03	4.60	0.14	3.89	0.12	0.5	0

Table4 Change in capacity and gas pressure under various experimental conditions

The amount of charge in experiments No. 1,2,3,4 and 5 was 140% of the previous discharge, although it was 450% in No.6



Fig.4 Variation of terminal voltage and gas pressure with the amount of charge

- A; Compression pressure of 0.05MPa
- B; Compression pressure of 0.2MPa
- C; Compression pressure of 0.5MPa
- D; Compression pressure of 0.8MPa

の標準電位について、Milner ら⁷⁾は30%KOH,25℃,1atm でHg/HgOに対しそれぞれ、-0.899V、および-0.960Vで あると述べている。両者の差は61mVであるので、本実験で 水素発生があるものと推定された電池の充電終期の端子電圧 増加分50mV前後とおよそ合致している。これは上記の反応 (1)と(2)の標準電位の差が、密閉型Ni-Cd電池における 水素発生有無の場合の端子電圧の差の主要な原因であること を示すものと考えられる。

また,充放電を長期にわたって反復し,その間の容量変化 を測定したところ,構成圧が高いほど容量の低下傾向は大き かった.

4. 結 言

- (1) 電極群の構成圧が低い場合,電極群を飽和する電解液量を注加した密閉電池は,充電時のガス圧が大きくなる傾向にある.しかし,この場合は電解液量を20%程度減らしても密閉電池の容量は著しく変わらない.
- (2) ストレンゲージにより、ステンレス製金具を用いて電 極群の構成圧が、0.05、0.2、0.5および0.8MPa である

4個の密閉型ニッケル・カドミウム電池を構成した.こ れらの電池の電極群の見かけの容積と,密閉容器内の電 極群以外の空間容積との比はおよそ1:1であった.こ れらの電池のうちで構成圧が0.05MPaのものには電極 群を飽和するのに必要な電解液量の80%,その他の電池 にはすべて100%の電解液を加えて,電池の容量ならび に充電時のガス圧におよぼす充電電流の大きさ,充電量 および温度の影響を求めた.構成圧が0.5および0.8MPa の場合,温度0℃で充電量を450%とすると両者のセル 内で水素の発生したことが考察され,ガス圧の上昇も大 きかったが,その他の条件では実験した条件の範囲内で 発生した酸素の吸収は良好に行われたものと認められ る.ガス圧の低い電池の容量は,開放液電池の容量に対 しおよそ80%であった.

- (3) 4種の密閉電池の耐久力を比較すると、構成圧が高い ほど短く、0.05MPaの構成圧の電池が最良であった.
- (4) 乾燥した電極群に電解液を注加した場合,構成圧が緩 和される状況をストレンゲージの歪み比によって測定した.

謝 辞

本研究は、2018年度理工/建築・環境学会研究補助費を 受けて実施いたしました.ここに記して感謝申し上げます.

文 献

- 日本電池株式会社編,最新実用二次電池,日刊工業新聞 社,p241 (1999).
- 日本電池株式会社編,最新実用二次電池,日刊工業新聞 社,p259 (1999).
- H.B. Lunn and J.P. Parker, "Batteries", Vol.2, Pergamon Press, p.129 (1964).
- 4) D.R. Turner, W.E. Howden, Y. Okinaka and E.J. McHenrg, "Power Source", Pergamon Press, p.349 (1966).
- 5) 佐々木康,山下嗣人,関東学院大学理工/建築・環境学 会研究報告, 59, pp.105-105 (2016).
- 6) 佐々木康,山下嗣人,材料の科学と工学,51, pp.38-39

(2014).

7) P.C. Milner and U.B. Thomas, "Advances in Electrochemistry and Electrochem. Engineering", Vol.5, Interscience Pub., p.58 (1966).

研究論文

水素吸引が陸上長距離選手の生体機能へ与える影響

高橋健太郎*
 川口 港*

The effect of hydrogen inhalation on the biological functions of long-distance runners

by

Kentaro TAKAHASHI Minato KAWAGUCHI

要 旨

本研究は、陸上競技長距離選手において、運動前の水素吸引が運動中の血中乳酸へ及ぼす影響を明らかにすることと同時に、 運動前の水素吸引が競技能力の差によってどのような影響を与えるか明らかにすることを目的とした.その結果、水素吸引をす ることによって、運動中の心拍数も減少し、運動後の血中乳酸値の増加率は抑制され、減少率は増加することが明らかとなった. よって、運動前の水素吸引はより競技力の高い陸上競技長距離選手において、血中乳酸の除去能力を向上させる可能性があるこ とが示唆された.

キーワード:水素吸引,陸上長距離選手,血中乳酸

Abstract

The purpose of this study was to clarify the effect of pre-exercise hydrogen inhalation on blood lactate during exercise in long-distance runners, and to clarify the effect of pre-exercise hydrogen inhalation on athletic performance differences. The results showed that hydrogen inhalation reduced the heart rate during exercise, and the rate of increase in blood lactate level after exercise was reduced and increased. Therefore, it was suggested that pre-exercise hydrogen aspiration may improve the ability to remove blood lactate from the highly competitive long-distance runners.

Key Words: hydrogen inhalation, long-distance runner, blood lactate

1. 緒 言

近年,ヒト生体に与える水素の効果が注目されている.水 素は体内の活性酸素を除去する働きが明らかにされつつあ る.活性酸素は体内で酸素が変化したもので物質を酸化させ る力が強く,その力で肌や神経,内臓などの細胞を傷つけて いくと報告されている¹⁾.Ohsawa 6²⁾によれば,水素は活 性酸素を減らす抗酸化作用があることを報告しており.上村 と太田³⁾は,水素医学の進歩はめざましいもので,水素の医 療研究が進められるようになり,現在では500報以上の論文 が発表されるようになったと報告している.

水素には様々な効果があると報告されており、水素水には 動脈硬化を抑制する作用があることや、水素水の飲水は、メ タボリック症候群の治療及び予防に有用な新たな方法となり うることも報告されている4),5).さらに飲料としての水素は 運動にも効果があるといわれており、Aoki ら⁶ は激しい運 動前の水素水による水分補給は、血中乳酸の上昇を抑える効 果があると報告している. ランニングでは、無気呼吸に伴う 乳酸が生じ続けると、筋細胞が酸性になるせいで、エネル ギーを生むためのグルコースの分解という代謝経路が抑制さ れる. そのため、乳酸の蓄積によってエネルギーの産生が減 速せざるを得ない. すなわち血中乳酸の上昇を抑えるという ことは、より負荷の高いトレーニングをすることが可能にな る⁷⁾. さらに村松ら⁸⁾は、活性水素水の摂取は運動時におけ る代謝及び循環を向上し、パフォーマンス向上の可能性をも たらす可能性が伺われたと報告している. そのため水素はス ポーツ選手の競技成績を向上させることができるのではない かと、近年注目されている。しかし、水素吸引が運動に及ぼ す影響について言及する報告は少ない.

そこでLT(乳酸性作業閾値)やOBLA(血中乳酸濃度上 昇開始点)などを練習の指標とする陸上競技長距離選手や乳 酸を多く作り出す解糖系運動をおこなう陸上競技中距離選手 において競技成績への影響が大きいのではないかと考えられ る.

またエリート選手は運動中に非エリート選手よりも高濃度 の乳酸に耐えられることがわかっており,運動をやめたあと も、血中や筋肉中の乳酸をより効率的に取り除くことが可能 である.血中乳酸値の上昇を抑えるということは、より負荷 の高いトレーニングをすることが可能になる.しかし、水素 吸引が運動に及ぼす影響について明らかにされていないとこ ろも多い.陸上競技長距離種目では、血中乳酸値が練習強度 の一つの指標として多く使用されているおり、血中乳酸値と 競技成績の影響が大きいのではないかと予想される.

そこで本研究は、陸上競技長距離選手において、運動前の 水素吸引が運動中の血中乳酸値へ及ぼす影響を明らかにする ことと同時に、競技能力の差によってどのような影響が生じ るのかを明らかにすることを目的とした.

2. 方法

2.1 被検者

測定の趣旨,方法について十分に説明し書面にて同意を得た,長距離種目を専門とする大学陸上競技部に所属する学生8名(年齢:21.25±0.43歳,身長172.25±1.09cm,体重58.25±4.87kg)を被検者とした.なお,本研究は,関東学院大学生物実験倫理規定に基づき,同倫理委員会の承認を得て実施した(生2018-1).

2.2 水素発生装置

本研究で用いた水素発生装置は MHG-2000 α (MiZ 株式 会社製)を用いておこなった。この装置は水を電気分解させ ることで水素ガスを発生させているもので6~7%の水素ガ ス濃度を発生させることが可能である。なお、9%までの水 素ガス濃度は Kurokawa ら⁹⁾によって安全性も確認されてい る.また、本研究では、プラセボ機として水素が発生しない 同じ形状の同装置も準備した.水素は、カニューラを用い鼻 から吸引させた.

2.3 実験試技

本研究では、グラウンドでおこなうものと研究室内でおこ なうバイクによる2種類の運動課題を行った.バイク実験で は長距離班を一番最近の10000メートルのタイムから上位群 4名と下位群4名に分け比較した.

グラウンド実験では、普段のトレーニング時の走スピー ドにて30分間のランニング課題をおこない、運動の直前に 水素発生装置を用いて20分間の水素吸引をおこない、運動 前後の血中乳酸濃度を指尖より採血し、Lactate Pro2 (アー クレイ社製)を用いて測定した.また、バイク実験では、長 距離走でのスピードトレーニングと同様の負荷をかけること を目的としている. 運動課題を行う際の負荷値を設定するた め, エアロバイク (75XLⅢ, コナミ社製) に搭載されてい る体力テストを被検者におこなわせ、付属している心拍数計 より PWC75% HRmax, PWC85% HRmax を負荷値として 設定した. 被検者には、水素発生器とプラセボ発生器のど ちらかをわからないように20分間吸引させた. その後、あ らかじめ設定された負荷値で3分間運動を行った. これを PWC75%HRmax で3セット, PWC85% HRmax で1セット おこない、最後に60秒間全力でバイクを漕がせた. なお運 動と運動の間に5分間の休憩をはさんだ.最終試技終了後に は、60分間の安静を保った. グラウンド、バイク共に実験 は2回行い,水素吸引,プラセボ吸引をそれぞれ別日に行っ た. 血中乳酸値は、水素またはプラセボ吸引前後、運動と運 動の間の休憩時、最終試技終了直後、安静経過15、30、45、 60分後に測定した.

2.4 統計処理

結果はすべて平均値をもって示し、2群間の比較には対応 のないT検定を用いた.なお,危険率5%未満を有意とした.

3. 結果

3.1 グラウンド実験における血中乳酸値の変化

30分の運動課題を終えた前後の血中乳酸値を比較したと ころ、上位群、下位群ともに水素吸引をおこなった際には、 プラセボ吸引時に比べ有意に減少していた(Fig.1, Fig.2). その際に、上位群、下位群との変化率の差はみられなかった.

3.2 バイク実験における血中乳酸値及び心拍数の変化

水素吸引後に測定した血中乳酸値から、運動と運動の間の 休憩時に測定した計4回の血中乳酸値の増加率と、各運動中 に測定した最大心拍数の関係を Fig.3, Fig.4へ示す. その結 果. 運動課題を遂行するにしたがって血中乳酸値. 心拍数共 に増加していた.また上位群,下位群ともにプラセボ吸引時 に比べ、水素吸引時に血中乳酸の増加率が抑制され、心拍数 も大きく減少する傾向がみられた. さらに、下位群に比べ、 上位群のほうが上昇する傾きの差が大きい傾向がみられた.



上位群の運動前後における血中乳酸値の変化 Fig.1







3.3 バイク実験における血中乳酸値の減少率

最終試技終了直後に測定した血中乳酸値から30,45,60 分後に測定した血中乳酸値の減少率の関係を Fig.5, Fig.6へ 示す. その結果, 上位群は, プラセボ吸引時に比べ, 水素吸 引時に減少率が大きく増加する傾向がみられた。特に,45 分後に有意に減少していた. 下位群は、プラセボ吸引時に比 べ、水素吸引時に有意な差はみられなかったものの、60分 後の減少率は水素吸引群にてプラセボ群に比べ高い傾向がみ られた.

4.考察

4.1 水素吸引がエネルギー代謝へ及ぼす影響

本研究では、運動前の水素吸引時に上位群、下位群ともに 運動中の血中乳酸の増加率は抑制され、心拍数は減少してい た.また、上位群では運動後の血中乳酸の減少率は増加する 傾向がみられた. ミトコンドリア内では, 酸素を利用して乳





Fig.6 下位群における最終試技からの血中乳酸値の減少率

酸を水と二酸化炭素に分解する過程で大量の ATP 産生をお こなっていることが知られている¹⁰⁾. このことから、水素を 吸引することにより、ミトコンドリア内で発生した活性酸素 を除去しているため乳酸の除去能力も向上することができる と思われる. 有酸素性エネルギー代謝の指標として心拍数, 無酸素性エネルギー代謝の指標として血中乳酸濃度が一般的 に用いられている.よって、心拍数や血中乳酸値の上昇を抑 制していることは、水素吸引がエネルギー代謝能力を向上さ せていると考えられる. Aoki ら⁶⁾ や久保¹⁾ は、激しい運動 前の水素水による水分補給は、血中乳酸の上昇を抑える効果 があるだけでなく筋疲労も軽減すると報告している. さら に,マグ水素を入浴剤として用いた一週間の入浴は,遅発性 筋肉痛の軽減に有効である、という報告¹¹⁾もある.水素水 と同様に運動時に大量に発生する活性酸素を抑制する効果の ある水素吸引においても運動中の血中乳酸除去能力が向上す れば、筋エネルギー代謝も向上することが示唆される.

4.2 競技能力への影響

本研究では、上位群において水素吸引時に血中乳酸の増加 率が抑制され、心拍数も大きく減少する傾向が顕著にみられ た(Fig.3). また、上位群は血中乳酸を除去する能力も高い ことが示された(Fig.5). 有酸素運動時には、活動組織での 酸素利用量が増加するため、ミトコンドリア電子伝達系から の活性酸素発生が増加することが考えられる.また、運動強 度の上昇に伴って活性酸素の生成量が増加することも報告さ れている12).水素は吸引することによって短時間で細胞の核 とミトコンドリアに到達し、核 DNA とミトコンドリアを保 護することも明らかになっており、水素吸引後に心拍数も減 少していたことから、ミトコンドリアを損傷させる活性酸 素を体内へ吸収された水素が抑制したことにより、ATP の 産出量も上がったのではないかと考えられる. それにより, ATP を作り出すミトコンドリアの数が多いと思われる競技 力の高い人の方が,活性酸素によるミトコンドリアの損傷を 抑制する水素吸引の効果が、より大きい傾向にあるのではな いかと考えられる. Ohsawa ら²⁾ は水素が最も反応性の高い 活性酸素種であるヒドロキシラジカルとペルオキシナイトラ イトを減少させると報告しているが、血中乳酸値の減少を示 す明確なメカニズムは明らかになっていない. これらメカニ ズムを明らかにすることは、今後の課題であるとともに本研 究における限界である.

以上のことより,運動前の水素吸引は,体内の活性酸素を 除去するだけではなく,運動後の血中乳酸の除去能力をも向 上させる可能性がある.今後,より質の高いトレーニングを おこなうためには,水素吸引がその一助となり得ると示唆さ れた.

5. 結 論

本研究の結果から,運動前に水素吸引をすることによって, 運動中の心拍数は減少し,運動後の血中乳酸値の増加も抑制 されることが明らかとなった.また,運動前の水素吸引はよ り競技力の高い陸上競技長距離選手において,筋エネルギー 代謝を向上させる可能性があることが示唆された.

謝 辞

本研究は、メモリーテックホールディングス株式会社より 研究助成を受けておこなわれた.また、関東学院大学陸上競 技部、身体動作学研究室の学生に協力を頂きました.この場 にて御礼申し上げます.

参考文献

- 1) 久保伸夫:水素ガス吸引のススメ,株式会社ビオ・マガジン,(2017).
- 2) Ohsawa I, Ishikawa M, Takahashi K, Watanabe M, Nishimaki K, Yamagata K, Katsura K, Katayama Y, Asoh S, Ohta S: Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. Nat Med.,2,13 (6), 688-694, (2007).
- 土村直美,太田成男:水素水による脳機能維持効果と健 康増進への展望,体力科学,66-1,63,(2017).
- 4) Ohsawa I, Takahashi K, Watanabe M: Consumption of hydrogen water prevents atherosclerosis in apolipoprotein E knockout mice, Biochem. Biophys. Res. Commun., 377, 1195-1198, (2008).
- 5) Atsunori Nakao: Effectiveness of Hydrogen Rich Water on Antioxidant Status of Subjects with Potetial Metabolic Syndrome- An Open Label Pilot Study, J. Clin. Biochem. Nutr., 46, 1-10, (2010).
- 6) Aoki K, Nakano A, Adachi T, Matsui Y, Miyakawa S: Pilot study: Effects of Drinking Hydrogen-Rich Water on Muscle Fatigue Caused by Acute Exercise in Elite Athleates, Med. Gas Res, 2, 12, (2012).
- ジョン・ブルワー:ランニング・サイエンス、河出書房 新社、(2017).
- 8)村松成司,藤原健太郎,伊藤幹,藤田幸雄,服部祐兒: 大学長距離ランナーの酸化ストレスに及ぼす活性水素水 摂取の影響,千葉大学教育学部研究紀要,第58巻,351-358,(2010).
- 9) Kurokawa R, Hirano S, Ichikawa Y: Preventing explosions of hydrogen gas inhalers, Med Gas Res, 9, 160-162, (2019).
- 10) 渡辺正仁,由留木裕子,有末伊織,藤田浩之,出田めぐみ, 西井正樹,築山邦夫,渡辺克哉:活性酸素種と水素療法, 保健医療学雑誌,11-2,160-174,(2020).
- 11)河村拓氏:運動後の酸化ストレスおよび遅発性筋肉痛 に及ぼす水素入浴剤を用いた入浴効果,体力科学,65, 297-305,(2016).
- 12) 増田和実,田辺解:高齢者の運動と活性酸素,体力科学, 52,73-82,(2003).

地際部と角部に腐食損傷を有する鋼製橋脚の模擬地震波による耐荷性状の検討

大	谷	友	香*
北	原	武	嗣 *
河	野	洋	佑 **
永	田	和	寿 ***

Seismic performance of corroded steel bridge piers at subjected to simulated motions

by

Yuka OHTANI Takeshi KITAHARA Yosuke KONO Kazutoshi NAGATA

Abstract

Herein, dynamic analyses were performed assuming that the corners and the bottoms were corroded. Corrosion damage to steel bridge piers mainly occurs at the corners where the coating film becomes thin and at the bottoms where rainwater is retained. If corrosion damage progresses, it should be worried that seismic performance cannot be ensured during a large-scale earthquake. In this study, the purpose of this study is to understand the effects of damage location, degree of damage, and input long-period waves (such as Nankai Trough Earthquake) on seismic performance. As the corrosion damage progressed, the maximum displacement increased and the maximum load decreased. The rate of change is affected by changes in the natural period due to corrosion damage and the periodic characteristics of seismic waves.

Key Words: Steel bridge piers, corrosion damage, seismic performance, simulated motions, long-period waves

1. はじめに

近年、インフラ構造物の老朽化が顕在化している中、特に、 鋼橋は自然環境の影響を受けやすく、腐食損傷する事例が多 くみられるようになってきている. このように腐食損傷など を受け老朽化した鋼橋の残存性能を把握し、維持管理を適切 に行うことが求められている.

鋼製橋脚において腐食損傷は、塗膜が薄くなりやすい橋脚 角部¹⁾、雨水等の滞水が生じやすい橋脚基部²⁾にかけて発生 することが多い傾向にある、このような鋼材の腐食が進行し た場合、断面欠損による耐荷力低下などが生じることも考え られ、地震時において十分な耐震性能が確保できなくなるこ とも懸念される. さらにより顕著に進行すると. き裂や破断 などの大規模な損傷につながる恐れも考えられる.

これまでにも健全時の状態を対象とした鋼製橋脚に関して は、その耐震性能に関して多くの研究が行われている. 後藤 ら³⁾、青木ら⁴⁾は、鋼製橋脚を模した試験体に水平2方向荷 重を与え、耐震性能を解析的および実験的に検討した結果を 報告している. 葛ら5 は偏心した逆L形鋼製橋脚の耐震性 能を、松村ら⁶⁾ は鋼製門形ラーメン橋脚の面内方向載荷時に おける耐震性能を解析的に検討している.

これまでの検討では、腐食損傷など劣化の生じた鋼製橋脚 を対象とした耐震性能に関しては十分に検討されていないの が現状である、この観点から、著者らは角部に腐食損傷を有 する鋼製橋脚を対象に、静的実験および静的・動的有限要素 解析による検討を行い、腐食損傷の進行に伴い鋼製橋脚の耐 震性能が低下することを明らかにしてきている^{例えば1),7)}.

しかし未だ、角部以外の腐食損傷を想定した研究や、異な る振動特性をもつ地震動を用いた検討までは行われていない のが現状である、滞水による腐食損傷が生じやすい基部は、 地震時に発生する曲げモーメントも大きく箇所であり、早急 な検討が必要であると考えられる.

そのため文献8)では、基部のみが腐食損傷した場合や、 角部と基部の両者が腐食した場合を考慮し、複数の観測地震 波による検討から,腐食損傷箇所や腐食損傷の程度の違いが 耐震性能に与える影響を考察した.本研究ではさらに、巨大 海溝型地震を想定したいくつかの模擬地震波を入力とした時 刻歴応答解析を行い、これまでの検討結果と比較して長周期 地震による影響の有無に関して検討することを目的とした.

2. 解析概要

(1) 解析モデル

腐食損傷が生じていることを前提とするため、高度経済成 長期の旧耐震基準で設計された矩形断面を有するT型の既 設鋼製橋脚を対象とした. ここでは、著者らの既往研究で実 施した実橋梁を対象とした実験^[1]で参考にした橋脚を元に モデル化を行った、この際、補剛板パネル全体の幅厚比パラ メータR。補剛材間の幅厚比パラメータR。柱の全体座屈 強度に関するパラメータである細長比パラメータλ、縦補 剛材剛比γ/γ*が実橋梁と解析モデルとで同等となるよう

解析モデルを設定した. Table1および Fig.1に解析モデル諸 元を示す.

上部構造質量 m は、健全時の橋脚モデルの全断面降伏軸 カP。の10%として軸力Pを算出した.また、解析モデルの 上端節点と質点は剛体要素で結合し平面保持するようにして いる。

(2) 腐食損傷位置

本研究で仮定した腐食損傷位置とサイズを Fig.2に赤で示 す. この際、損傷箇所は板厚を減少させることにより腐食損 傷を再現した. 経年劣化によって塗膜が剥離しやすい角部, 滞水が発生しやすい基部.また角部と基部が共に損傷した3 ケースを考慮して損傷を設定した. それぞれを Fig.2(a)~(c) に示す

角部損傷時は、基部から高さ方向750 mmの範囲を、左右 板幅方向に15 mmの板厚減少を、基部損傷については高さ

[a	blei	l Sp	ecifica	tions (ot	anal	ysis	mode	əl
-----------	------	------	---------	---------	----	------	------	------	----

5300
750
1000
750
15
75
8
1.79×10^{5}
0.686
0.442



-50 -



Fig.2 Corrosion part (Unit: mm)

方向7.5 mm の幅でフランジおよびウェブ板幅方向全てに腐 食している状況を想定し,板厚を一様に減少させた.ここに 板厚の減少量として,健全モデル(損傷0%),損傷25%時, および損傷50%時とした3パターンのモデルを作成した. これらの数値は,腐食実態調査結果⁹⁾において,実橋梁寸法 で角部に腐食幅30 mm,腐食高さ200 mm,板厚方向に腐食 率20%程度が観測されていることを参考に.本モデルでの 腐食幅および腐食設定高さを決定した.

板厚減少による腐食損傷のモデル化状況を Fig.3に示す. この際,腐食要素を内側へオフセットすることで外面に腐食が生じていることを表現した.損傷箇所における断面積および健全時を基準とした断面欠損率を,角部損傷時は Table2,基部損傷時を Table3に示す.

汎用有限要素解析ソフト DIANA10.2による非線形動的解 析を行った.使用要素は主に4節点四辺形アイソパラメト リック曲面シェル要素を、メッシュサイズ変更部分には3 節点三角形アイソパラメトリック曲面シェル要素を用いた. メッシュ分割は、角部損傷箇所については基部からの高さ 750 mm までを腐食損傷部として高さ方向に100分割、板幅 方向に1分割した.基部損傷箇所については基部からの高さ 7.5 mm までを腐食損傷部として高さ方向に1分割、フラン ジ幅1000 mm に対して130分割、ウェブ幅750 mm に対して 100分割とした.

一方,腐食損傷が生じていない高さ750 mm以上の健全部 については、高さ方向に72分割、フランジ幅方向に16分割、 ウェブ幅方向に12分割した.健全部に対して腐食損傷部の メッシュサイズを細かくすることで、シェル要素のアスペク ト比を考慮しながら解析精度を図るものとした.なお、シェ ル要素の板厚方向は7分割とし、面外曲げによる板厚方向の 応力勾配を考慮している.



Fig.3 Cross-section defect (Unit: mm)

Table2 Cross-section defect rate (corner)

Degree of damage	Initial	25%	50%
Cross-section area (mm^2)	54000	53606	53325
Cross-section defect rate (%)	0	0.07	0.23

Table3 Cross-section defect rate (base)

Degree of damage	Initial	25%	50%
Cross-section area (mm ²)	54000	40931	27975
Cross-section defect rate (%)	0	24.2	48.2

(3) 材料特性と境界条件

材料構成則は移動硬化型バイリニア型モデルとし、二次勾 配は初期剛性(ヤング率) E の1/100とした. 今回の解析で は、材料特性および構造特性を Table4に示す.境界条件は、 基部のみ6自由度固定とている.

なお,今回の解析では大変形領域までは応答が進展しない と考え,幾何学的非線形性は考慮していない.また残留応力 および初期不整も影響は小さいと考え考慮していない.

時刻歴応答解析に際し、まず固有値解析を行った結果とし て角部・基部損傷時に関して Table5に示す。角部のみ、基 部のみの結果は角部・基部損傷とほぼ同様の値のため掲載は 省略する。表より健全時に対して損傷50%の場合でも、そ の差異は0.2% 程度以内と小さいことが分かる。

(4)入力地震動

文献8)では1995年兵庫県南部地震,2011年東北地方太 平洋沖地震,および2016年熊本地震における観測地震波を 入力とした検討を行った.本研究では,近年発生が懸念され ている海溝型巨大地震による検討を目的として,東海地震と 南海地震を想定して作成された想定東海地震波と想定南海地 震波を入力地震波として用いるものとした¹⁰⁾.これら模擬地 震波の諸元を Table6に示す.

Table6は工学的基盤で定義された地震波である.本研究の解析対象は都市高速に用いられる鋼製橋脚であることか

Young's modulus E (N/mm ²)	$2.0 imes 10^{5}$
Yield stress σ_y (N/mm ²)	325
Poisson's ratio μ	0.3
Yield displacement δ_y (mm) [Y-direction]	36.52
Yield Load H_{v} (kN) [Y-direction]	752.15

Table4 Property of material

Table5 Natural period (unit: s)

Degree of damage	0%	25%	50%
1^{st} mode	0.6080	0.6091	0.6106
2^{nd} mode	0.4878	0.4887	0.4899
$3^{\rm rd}$ mode	0.0589	0.0590	0.0591
4 th mode	0.0214	0.0214	0.0215

Table6 Input simulated motions

Forthquake		Acceleratio	Duration	
Lar	пquake	NS	EW	time (s)
	Foundation	162.6	187.9	
Scenario	Twice	325.1	375.7	150.0
Tokai	3 times	487.7	563.6	150.0
	4 times	650.3	751.5	
	Foundation	159.9	105.1	
Scenario	Twice	319.8	210.2	150.0
Nankai	3 times	479.7	315.3	130.0
	4 times	639.6	420.4	

ら,地盤種はⅡ種であることが多いと想定される.そのため 工学的基盤からは増幅された地震波が地表面に伝達される傾向となる.そこで,表層地盤での増幅を考慮して,Table6 に示した工学的基盤における最大加速度を2倍,3倍,4倍 と入力レベルを増大させた場合の検討も行うものとした.入 力地震波の例として,Fig.4に想定東海地震(2倍),Fig.5に 想定南海地震(4倍)の加速度時刻歴波形を示す.

これらの地震波を解析モデルのX方向にEW成分を,Y 方向にNS成分を入力して時刻歴応答変位解析を行った.減 衰設定は,Rayleigh減衰を用いて減衰定数を3%とした.

つぎに,減衰定数5%時の加速度応答スペクトルをFig.6 に対数目盛表示にて示す.参考に,文献8)で検討した観測 波の応答スペクトルも合わせて表示している.

座屈が生じやすい Y 軸方向に入力する NS 成分に関して は、文献 8) で検討した益城町宮園,西原村小森,築館の地 震波については短周期成分が,JR 鷹取については 1 秒程度 の成分が強いことが確認できる.一方,今回の検討に用いた 地震波である,海溝型巨大地震を想定した想定東海地震は 3 秒程度,想定南海地震は 2 秒程度と,観測地震波よりも長周 期領域において卓越していることがわかる.









3. 解析結果とその考察

角部のみ,基部のみ,および角部・基部の損傷時の結果は ほぼ同様の傾向を示したので,角部・基部腐食時の結果のみ を代表して例示しながら考察を進める.またY方向の応答 がX方向よりも卓越していたため,基本的にY方向の応答 を中心に議論する.

(1)荷重-変形関係

Fig.7に橋脚頂部の質点部における Y 方向の水平荷重-水 平変位関係を示す.水平荷重と水平変位をそれぞれ縦軸と横 軸にとり,それぞれ,降伏水平荷重,降伏水平変位で除して 無次元化して示している.(a)には想定東海地震(2倍)の,



Fig.6 Acceleration response spectrum

(b) には想定南海地震(4倍)の結果を示す.

想定東海地震では最大変位2∂,程度の,想定南海最大変位 は2∂,~3∂,程度の安定した履歴を描いていることがわか る.また,どちらの地震波に対しても,健全時,損傷25%, および損傷50%のすべての場合において荷重-変形関係は ほぼ同様の応答結果を示しており,損傷の進展による明確な 差異は生じていない.これは,橋脚全体に対して損傷個所が 限定的な範囲であり,損傷による断面欠損の割合も小さいこ とが一因だと考えられる.損傷位置・損傷程度がより広範囲・ 高割合な場合の検討も今後行いたい.

(2) 最大変位および最大荷重の変化率

橋脚頂部の質点部における最大応答水平変位,および橋脚 基部における最大応答水平荷重(以下,それぞれ最大変位, 最大荷重と呼ぶ)に与える影響をつぎに検討する. Fig.8に 各最大変位,最大荷重に関して,腐食損傷の進行度別に比較 したものを示す.なお最大変位,最大荷重は3.(1)と同 様 Y 方向応答に関して,それぞれ初期降伏変位,降伏荷重 で無次元化した値としている.また,損傷の進行度別に,最 大変位および最大荷重の健全時からの変化率を示す.

図から,想定東海地震(2倍)および想定南海地震(4倍) のどちらにおいても,腐食損傷が進行するとともに,変化率 の絶対値は小さいものの,最大変位は増加し,最大荷重は減 少する傾向を示した.この傾向は文献8)の観測波による結



Fig.7 Relationship with load and displacement

果と同様である.

腐食の程度が大きいほど最大応答変位が増加するのは、腐 食損傷による断面欠損により剛性が低下するためであると考 えられる.

健全時に対して損傷50% 時では,最大変位増加率は想定 東海地震で1.6%程度,想定南海地震で1.1%程度,最大荷重 低下率は想定東海地震で0.3%,想定南海地震で1.2%程度の 値となっている.今回検討した断面欠損率程度では,最大変 位および最大荷重ともに変化率の絶対値自体は小さな値で あったが,断面欠損率のより大きな場合には必ずしも無視し うる変化率ともいえないと考えられる.

つぎに,角部のみ,基部のみ,および角部・基部損傷に関して,最大変位の変化率を Table7にまとめる.表より,角部・

基部損傷時の最大変位変化率は、角部のみと基部のみの変化 率の和におおよそ等しいこともわかる.

これらの傾向は観測波による結果とほぼ同様であり,海溝 型巨大地震による長周期が卓越する地震波による差異は確認 できなかった.

Table7 Change rate of maximum displacement

	Scenario T	okai ($\times 2$)	Scenario Nankai (\times 4)		
	Damage Damage 25% 50%		Damage 25%	Damage 50%	
Corner	0.7	1.3	0.4	0.9	
Base	0.1	0.2	0.1	0.2	
Corner/ Base	0.8	1.6	0.5	1.1	

(3)橋脚基部付近の応力状態

健全時,腐食率25%時,および腐食率50%時における, 最大応答変位発生時での変形形状と応力コンターを Fig.9に 示す. なお,変形形状には,基部から750mmの範囲を示す. この際,変形状態を確認しやすいように6倍に拡大して示し ている.また,応力コンターは Mises 応力を示しており,降 伏応力(325N/mm²)以下の部分を青色に,降伏応力を超え た部分については4段階でコンター表示している.

想定東海地震(2倍)では、健全時および各損傷度のどの 状態においても降伏応力以下の範囲が広く広がっており、大 きな応力が生じているのは基部のみである.また、腐食率が 大きくなっても全体的に応力状態の大きな変化は見られず、 基部のみ応力が増大していることがわかる.一方、想定南海 地震(4倍)では降伏してる領域が全体的に広がっているこ とも確認できる.どちらの地震波による応力状態でも、健全



Fig.8 Change rate of maximum response from initial condition



Fig.9 Stress contour diagram at maximum displacement

時から腐食率50%まで大きく明瞭な変化は認めらない.これは3.(2)で検討した最大荷重変化率の割合が小さかったことと一致しているといえる.

4. 結論

巨大海溝型地震を想定した模擬地震波(想定東海地震およ び想定南海地震)による検討から,これまでに実施してきた 観測波による結果とのほぼ同様の傾向が確認できた.すなわ ち,腐食損傷が進行するとともに最大応答変位は増加傾向を, 最大荷重は減少傾向を示すが,ここで考慮した腐食率(すな わち断面欠損率)程度では絶対値自体は大きなものではない ことを示した.さらに,角部損傷時および基部損傷時の結果 から,角部と基部の両方に腐食があるときの最大変位変化率 を概略評価可能であることもわかった.

今後,より大きな腐食率や腐食範囲が発生している場合の 検討や,幾何学的非線形性やおよび初期不整などの影響も考 慮した検討を行っていくことが課題であると考える.

謝 辞

本研究を実施するにあたり、2019年度関東学院大学理工 /建築・環境学会の研究補助費の助成を受けた.

参考文献

- 永田和寿,加藤慶太朗,杉浦邦征,橋本国太郎,北原武 嗣:角部に腐食損傷を有する矩形鋼製橋脚の水平2方向 挙動に関する研究,構造工学論文集A,第58巻,pp.299-309,2012.
- 2) 公益社団法人,土木学会:土木構造物のライフサイクル

マネジメント~方法論と実例,ガイドライン,丸善出版, pp.97-107, 2013.

- 3)後藤芳顯,江坤生,小畑誠:2方向繰り返し荷重を受ける矩形断面鋼製橋脚柱の履歴特性,土木学会論文集A, Vol.63, No.1, pp.122-141, 2007.
- 4)青木徹彦,大西哲広,鈴木森晶:水平2方向荷重を受ける正方形断面鋼製橋脚の耐震性能に関する実験的研究, 土木学会論文集A, Vol.63, No.4, pp.716-726, 2007.
- 5) 葛漢彬,渡辺俊輔,字佐美勉,青木徹彦:面外繰り返し 水平力を受ける逆L字形鋼製箱形断面橋脚の耐震性能 に関する解析的研究,土木学会論文集,No.738,I-64, pp.207-218, 2003.
- 6) 松村政秀,本谷幸康,北田俊行:面内変形を受ける鋼製
 門形ラーメン橋脚のモデル化と耐震性能,構造工学論文
 集, Vol.57A, pp.94-103, 2011.
- 7) 永田和寿, 大野桂樹, 杉浦邦征, 北原武嗣:腐食により 断面欠損した鋼製橋脚の地震時挙動に関する検討, 構造 工学論文集 A, 第64巻, pp.231-240, 2018.
- 8)大谷友香,北原武嗣,河野洋佑,永田和寿,六谷拓真: 基部・角部に腐食を有する鋼製橋脚の地震波による耐荷 性状の影響,鋼構造年次論文報告集, Vol.28, pp.77-83, 2020.
- 9)中川美紀:鋼製橋脚の腐食状況調査と考察,名古屋工業 大学卒業論文,2015.
- 10)日本建築学会、東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会:巨大地震による長周期地震動の予測と既存建築物の耐震性と今後の課題、日本建築学会大会資料、2006.

セラピー/ヒーリング効果向上のための犬型 AI ロボット "aibo" の 動作制御プログラムの基礎的開発

Щ	\Box		亮 *
金	\mathbb{H}		徹 **
大	﨑	甲	斐**

Fundamental development of motion control program for dog-type robot "aibo" to improve therapy/healing effect

by

Ryo YAMAGUCHI Tohru KANADA Kai OHSAKI

要 旨

現代のストレス社会における高齢者特有の病気や精神疾患は、近い将来、世界的にも増加する.そのような症状の治療法の1 つとして、動物介在療法(アニマルセラピー)は、注目されている方法論である.しかし、生きている動物を使用することによ る感染症や日常のケアなどのデメリットがある.この不利な点を克服するために、動物介在療法の代わりにロボットセラピーが 適用可能である.本研究では、2台の犬型ロボットの運動制御プログラムを開発している.そのロボットの楽しい動きによって、 症状のある人に笑顔をもたらし、免疫力を高め、ストレスを和らげることが期待できる.ソニー株式会社が製造・販売している "aibo"という2台のロボットの動作を観察してもらった人によるアンケート回答の結果、2台の aibo の動きは非常に興味あるも のととらえられた.さらに、アンケート回答者がストレスにさらされている、および/または病院や介護施設に入院していると 仮定したときの回答結果は、ロボットの動きが人間の心に安堵をもたらすことができることを示した.ロボットの動きを観察す る過程で、観察している人の顔が撮影されており、その笑顔が画像処理によって抽出された.次に、aibo の動きと笑顔のタイミ ングを確認することで、aibo のどのような動きが観察者に笑顔をもたらすのかを明らかにしている.今後の課題は、介護施設で の長期実験での臨床評価である.また、笑顔の認識精度の向上も課題である.

Abstract

A disease peculiar to aged person and a mental illness in the modern stress society arises from an upcoming worldwide aging society in the future. As one of the treatment of such symptoms, animal therapy is an attention-getting methodology. However, it has a disadvantage such as an infection, disease and daily care owing to employ inlife animal. In order to get rid of the disadvantage, robot therapy is applied instead of animal therapy. This study intends to develop a motion control program for two dog-type robots. Bringing a smile to symptomatic person's face by the developed robots' enjoyable motion can boost immunity and relieve human's stress. The results of the questionnaire by observing two robots named "aibo", which is a production and distribution of Sony Corporation, show that many respondents find the two aibos' motion very funny. Furthermore, assuming that the respondent is under stress and/or is admitted into a hospital or nursing-care facility, the answer indicates that the robots' motion can bring relief for the hearts and mind of humanity. In the process of observing the robots' motion, a video is shot. A smiley face is picked out by means of video image processing. Then, by checking up the aibos' motion and the timing of the smiley face, the authors clarify that what kinds of motion bring a smile to observer's face. Clinical evaluation for long-term experiment in nursing-care facilities is an issue in the future. Improvement of recognition accuracy for smiley face is another task.

1 Introduction

Recently, Japanese aging society proceeds and the population ratio of the elderly becomes 28.4% which was maximum in the past. Then, the ratio will increase more and more¹. In the worldwide point of view, aging society will proceed in the coming half century in not only developed region but also developing area². In addition, we can communicate to the external world very easily by using modern information communication technology. Consequently, this will add to the stress by an increasing frequency of such communication and the mental illness owing to the stress becomes a problem in society.

Under such circumstances, health care intervention called "animal therapy" using animal is enforced in medical facilities and nursing-care facilities. Animal therapy has a psychological effect as follows; (1) building up a sense of pride, (2) lowering of a sense of anxiety, (3) physiological effect such as lowering of blood pressure and the number of heat beat and relaxing, and (4) social effect such as making a human relationship smooth and accession of linguistic interaction. These effects have mechanisms for the prevention of dementia of aging person, who is lacking in communication, and mental illness. Moreover, enhancement of the curative power of hospital patient and stress relief can be expected. There are many practical examples which obtain proof.

However, animal therapy has many questions such as allergy, communicable disease common to human and animals, and pet loss, which are straightforward mischief, and damage of home equipment and contamination to room, which are implicit mischief. Therefore, it is very difficult to give an absolute reaction for continuing operation³⁾. Thus, robot therapy, which is one of healthcare intervention, using robot instead of animal is attention-getting recently, and it is enforced in medical facilities and nurse-care facilities.
 Table 1 presents the comparison between robot therapy and animal therapy.

There are a RAT (Robot Assisted Therapy) and RAA (Robot Assisted Activity) in robot therapy. The purpose of RAT is explicit treatment and RAT is enforced under medical profession and/or expert. On the other hand, the purpose of the RAA is relaxation and RAA is applied for recreation in a certain facility. Even so, it is considered that RAA has a similar or somewhat limited benefit of treatment, because improvement tendency is recognized after RAA treatment. Therefore, the border between RAA and RAT is undetermined and the definitive difference is the presence or absence of the medical profession.

Accordingly, in this study, RAA treatment is enforced by means of motion control of two four-legged dog-type robots called "aibo". Namely, the authors develop the motion control program to improve the entertainment considering healing effect. Then, a questionnaire on healing effect is practiced after observing the two aibos' motion. In this study, "entertainment" is recognized as "bringing a smile to observer's face".

2 Preceding study

As preceding studies, some robot therapies as shown in **Table 2** are enforced to aged persons applying AIBO (earlier type) and PARO presented in **Figs. 1(a)** and **(b)**. In these studies, how to communicate between human and a robot is one-to-one interaction. Reference⁹⁾ verified that there are powerful effect of psychological stress (prostration and tightness, especially) lessening and improvement of sparkle applying an original robot called "Chobonyan" as shown in **Fig. 1(c)**, by analyzing the result of subjective response of questionnaire for a measure of temporary mood (current tightness, dysphonia, anger, disorder, fatigue and sparkle).

Item	Robot therapy	Animal therapy		
Psychological effect Buoyancy, positive emotion, effect by emotional exp		pression		
Physiological effect	Blood pressure, effect by lowering of cholesterol			
Social effect	Linguistic interaction between examinees and inter	venient persons		
Economical effect	Reduction of health care cost, creation of new industrials	Reduction of health care cost		
Safety aspect	Necessity of attention in design	Necessity of training		
Pet loss	Consideration not required, but unclear in nature	Necessity of psychological attention for precaution and reparation		
Infection disease	Not to warry	Management must, need caution for ill person		
Scenario	Easy by programming	Necessity of high degree of training		

 Table 1
 Comparison between robot therapy and animal therapy

		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
Sufferer	Therapy robot	Change of disease presentation
Male with dementia and ademonia	PARO	Severe joint inflammation became clear by the interaction with $\mathrm{PARO}^{5)}$.
Female with Alzheimer dementia and mixing different languages	PARO	The sufferer speak understandable sentence in a spontaneous way and mixing different languages ${\rm disappeared}^{5)}$.
Female with truculent action and megadose	PARO	The sufferer became positive more than a little, verbal exchange with care personnel became easy, and the amount of the drug decreased.
Female with moderate dementia and no communication	PARO	The sufferer became communica- tive with nursing staff and $\mathrm{family}^{\mathrm{5)}}$.
Female with Alzheimer dementia, no communication for seven years and motionless arms	PARO	Few days later, the sufferer call out "Fine" to PARO suddenly and extended her arm to $\rm PARO^{5)}$.
Female with dementia and problem behavior by loitering	AIBO	The sufferer made a call in a spontaneous way and the time staying one place get $longer^{6)}$.
Female with alogia and articulation disorder	AIBO	Her motivation of deliverance was improved $^{7\rangle}$.
Male with left visuospatial neglect	AIBO	His head movement became 3D-spatial and the effect of rehabilitation was clarified ⁸⁾ .

 Table 2
 Preceding study for robot therapy ⁴⁾



(a) AIBO (Earlier type)





(c) Chobonyan (Cat-type) 9)

Fig. 1 Examples of therapy robot

3 Study objective

This study is going to develop a motion control program to provide powerful healing effect to human even if the number of humans is larger than that robots. This is the difference compared to the preceding studies in Section 2. The two robots are controlled at the same instant. The effort belongs to the RAA. Then, the motion of the two robots is observed by examinees and a questionnaire to investigate the healing effect boosting entertainment is carried out. In this study, "entertainment" means "bringing a smile to someone's face".

Evaluation of the smiley face is done by video image processing used using machine learning techniques. By means of the video image processing and analysis of a questionnaire, the authors think that what robot motion can bring a smile to someone's face. In other words, this study objective is to develop robot motion control program to provide powerful healing to human even if the number of humans is larger than that of robots.

4 Effect of smiley face

A smiley face and laughing has an effect for irrigating the brain and act on not only improvement of immunity but also accession of brain blood flow. The image of brain blood flow is shown in Fig. 2. Figure 2(a) represents a normal condition, and Fig. 2(b) shows smiley condition⁴⁾. Accession of brain blood flow boosts the activation of brain cell and immune function activated hormone called neuropeptide is excreted. Furthermore, natural killer cell as an anticancer cell is also activated and the hormone including analgesic constituent such as beta-endorphin is excreted in large amount. These are available for not only dementia and cerebrovascular disease, but also improvement of immunity and curative power.

There are many reports dealing with the effect of a smiley face with stress relief. With reference to the influence of stress hormone to variation in cortisol for laughing, the amount of salivary cortisol is measured before and after hearing a comic storytelling and the result presents that





(a) Normal condition(b) Smiley conditionFig. 2 Image of blood flow in the brain¹⁰

the amount after the comic storytelling decreases compared to the amount before storytelling. This shows that laughing makes stress reduction effect higher¹¹⁾.

Therefore, in this study, a program which has a high entertainment for aibo's motion will be developed. Then, the authors investigate qualitatively and quantitatively the effect of letting many examinees (healthy people at the moment) become smiley faces and laugh. The smiley faces of the examinees are analyzed by means of video image processing during the observation of aibos' motion.

5 Applied robot

A four-legged dog-type robot called "aibo" (ERS-1000 by Sony) is applied in this study. The aibo has some kinds of sensors such as capacitance type touch sensor, ToF (Time of Flight) sensor, range sensor, 6-axis detection system, human sensor and illumination sensor (11 sensors in total), thus aibo is a multi-functional entertainment robot with artificial intelligence linking with a cloud server.

The aibo has 22 degrees of freedom. The moving parts are head, mouth, neck, lower back, front legs, rear legs, ear and tail. The external dimensions are $180 \text{mm} \times 293 \text{mm} \times 305 \text{mm}$ and its mass is approximately 2.2kg.

Figure 3 represents the appearance of aibo and **Fig. 4** shows body parts and sensors⁶. The aibo has an artificial intelligence function and can be controlled by WebAPI (Web Application Programming Interface). The authors develop a motion control program by Python.

6 Execution program

Coinstantaneous control for two aibos is performed by the individual device ID. The number of ID account in only one to register the two aibos. The two aibos are controlled with applying token issued to the account. A general outline of the control is shown in **Fig. 5**.

Execution of the developed program makes

- (1) Tonguing as the start of motion control (Fig. 6),
- (2) Feeling a person and approaching (Fig. 7),



Fig. 3 Appearance of "aibo"



- ① HTTP request of API and acquisition of response
- 2 Indication of API and acknowledgement of execution result
- ③ HTTP request for acquisition of API execution result

Fig. 5 Procedure of control¹²⁾

- (3) Dancing (Fig. 8),
- (4) Up-from-under looking (Fig. 9),
- (5) Stroking by a person (Fig. 10),
- (6) Rejoicing (Fig. 11), and
- (7) Turning back as the end of motion control (Fig. 12).
 - Considering the needs of a variety of motions with plot

Fig. 6 Tonguing (Start of motion control)

Fig. 7 Feeling a person and approaching

Fig. 8 Dancing

Fig. 9 Up-from-under looking

Fig. 10 Stroking by a person

Fig. 11 Rejoicing

Fig. 12 Turning back (End of motion control)

which are not boring, these seven consecutive motions are determined. Moreover, these seven consecutive motions are performed by the two aibos at the same instance.

The initial locations of the two aibos at the start of motion control are fixed manually. When the aibos can recognize an examinee after tonguing (1), the aibos begin to approach the examinee (2). Then, motionig from (3) to (7) are enforced. The elapsed time is approximately three minutes in the case of the initial distance between the examinee and the aibos is almost 500mm. There is a declination of elapsed time, according to the initial distance between the examinee and the aibos. Difference of stroking action to each aibo by the examinee causes a declination of elapsed time.

7 Questionnaire

A succession of the seven motions was observed by the students and office staffs (hereafter, "examiners") of the authors' university. The total number of examinees was 27 (male: 15 persons between the age of 20 to 28 years old, female: 12 persons between the age of 30 to 50 years old). Then, they answered a questionnaire.

The questionnaire items were as follows.

- (1) How do you feel to observe this motion?
- (2) Why do you feel so?
- (3) How do you feel to observe this motion if you were in hospital and/or atrabilious owing to stress?
- (4) Why do you feel so?

Five alternatives are set in (1) and (3). The results of (1) and (3) are represented respectively in Fig. 13 (a) and (b). In the free description (2), the followings were seen as positive comments.

- > The aibo is cute.
- When I stroke the aibo's head, I feel lovely, so that the aibo approach me and the two aibos dance.
- > The aibo heals me by only looking the aibo.
- It is interesting that the next motion of the aibo is non-predictable.
- > The aibo makes a very lovable movement.

However, a negative comment for (2) is as follows.

✓ I bless myself that not only emulating a real dog, but also exploiting a mechanical characteristic in the motion.

In the free description (4), the followings were seen as positive comments.

- > The aibo's aspect is very lovely.
- > I feel as though the aibo can understand myself.
- I feel happy to look approaching aibo when I get depressed.
- > I can get distracted by the aibo in motion.
- ➢ I feel healed from the aibo in motion.
- > I love dogs.
- It is a change of pace and I think I can find out temporal amusement.

However, negative comment for (4) are as follows.

- ✓ I become curious about mechanical noise.
- $\checkmark~$ I cannot feel the warmth of an animal (pet).

8 Extraction of smiley face

In order to measure smiley face quantitatively, the authors shot a video from the scene of examinee's observation of aibos' motion. In one scene, 4 examinees at a maximum was shot at the same time. After the shoot, the smiley face was extracted by means of video image processing using OpenCV. The number of shot group was 3. There were 4 examinees in Group 1 and Group 2, and 2 examinees in Group 3. The total number of examinees was 10 in 6 males and 4 females. These 10 examinees were out of 27 examinees who answered the questionnaire.

Using Harr Cascades, recognition of smiley face was performed after recognizing the human face by a selfproduced program.

In the recognition of smiley face, when the smiley face detector responds with even one examinee, the video frame was extracted and saved as a photograph. Then, the photograph was evaluated visually in terms of that which motion out of 7 motions, (1) to (7) mentioned in IV, is the case for the smiley face. In this regard, however, (4) upfrom-under looking and (5) stroking are considered as one motion, because (5) was the consequent motion of (4).

Table 3 represents the number of extracted frames in which the smiley face detector responds with. Table 4 represents the number of affected persons by the aibos' motion.

9 Consideration

As shown in **Fig. 13(a)** for questionnaire item (1), 52% is for "very interesting", 41% for "interesting", and 7% for "neither". Then, at lowest 93% of examinees interested in the aibos' motion. Therefore, it is clear that a succession of the two aibos' motions can put a smile on a person's face. In addition, we must respect the other 7% for "neither", and the negative comments in questionnaire item (2).

As shown in Fig. 13(b) for questionnaire item (3), 52% are for "be cured", 33% for "perhaps be cured", 4% for "neither", and 11% for "perhaps not be cured". Then, 85% of examinees feel cure and the other 15% does not feel cured. From this point of view, it can be said that a succession of the two aibos' motions does not necessarily mean healing to all the people. In addition, regarding questionnaire item (4), we must consider something else other than the motion itself.

As shown in Table 3, 1036 frames out of 4365 frames in Group 1, 292 frames out of 6045 frames in Group 2 and 290 frames out of 3750 frames in Group 3 were extracted as scenes of smiley faces. Then, all these extracted frames were checked visually and confirmed the scenes of motion for

Table 3 Extracted number of frames

Number of persons	Number of extracted frames/
constituting a group	Total number of frames
4 (Group 1)	1036/4365 (24%)
4 (Group 2)	292/6045 (4.8%)
2 (Group 3)	290/3750 (7.7%)

■ Very interesting. ■: Interesting. ■: Neither.

(a) How do you feel when you see the motion of aibos?

Be cured. ■: Perhaps be cured. ■ Neither. ■: Perhaps not be cured.
(b) What do you think when you see the motion of aibos if you are under stress or in nursing-care facility?
Fig. 13 Questionnaire result

smiley faces.

Consequently the result is shown in **Table 4** for 10 examinees. For "tonguing", 6 examinees became smiley faces. For "feeling a person and approaching", 5 examinees. For "dancing", 8 examinees. For "up-from-under looking"-"stroking", 10 examinees. For "rejoicing", 7 examinees. For "turning back", 7 examinees. More than half of the examinees became smiley faces to almost all the motions. The elapsed time for "feeling a person and approaching" became longer compared to the other motions. Therefore, it appears that this longer elapsed time led to the lower percentage of a smiley face.

The percentage of smiley face was calculated manually in

T I I .		NI I		· · · ·		•	• •	/	
lable	4	Numbe	r ot	smilina	person	ın	albos	motion	
		1 1011100		Simily	p013011		01000	monon	

Motion of aibos	Number of affected persons/Total number
Tonguing	6/10 (60%)
Feeling a person and approaching	5/10 (50%)
Dancing	8/10 (80%)
Up-from-under look	10/10 (100%)
Stroking	10/10 (100%)
Rejoicing	7/10 (70%)
Turning back	7/10 (70%)

this study. However, if it can be calculated automatically by means of computer processing, the evaluation will be more accurate in a quantitative way.

10 Conclusion

In this study, a coinstantaneous motion control program for two dog-type robots was developed to increase healing effect. In order to boost entertainment of the robot, a succession of motions was demonstrated and was observed by 10 examinees to get answers of questionnaire on the feeling for the motions. Then, the motions of the robots to bring a smile to a person's face were investigated under the condition of this study.

Especially, in the combined motion of "up-from-under looking"-"stroking", an examinee who did not touch the aibo also smiled. Therefore, even if the number of humans is larger than that of robots, the entertainment in this study can be available.

For the future, examinations at medical facilities and/or nursing-care facilities should be performed. Furthermore, increment of examinees should be an active assignment.

This paper was financially supported by the College of Science and Engineering, Kanto Gakuin University in 2019.

References

- Ministry of Internal Affairs and Communications, https:// www.stat.go.jp/data/topics/topi1211.html (Accessed on February lst, 2020) (accessed on Sept. 10, 2020 and written in Japanese).
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2020). World Population Ageing 2019 (ST/ESA/SER.A/444).
- T. Shibata and Joseph F. Coughlin, "Trends of Robot Therapy with Neurological Therapeutic Seal Robot, PARO" Journal of Robotics and Mechatronics, pp.418-425. 2014.
- K. Kawasima, "A Trial of Case-Study Classification and Extraction of Therapeutic Effects of Robot-Therapy: Literature Review with Descriptive-Analysis" Clinical psychology research report, pp. 155-167, 2013 (written in Japanese).
- T. Shibata, "Creating a new robot business by proposing robot therapy", Technology and economy, 448, pp. 13-21, 2004 (written in Japanese).
- Y. Kagawa, "Effects of introducing robot therapy", Measurement and control, pp.624-628, 2012 (written in Japanese).
- N. Kato, "Things to think about using robots for rehabilitation",pp.605-608, 2012 (written in Japanese).

63

- S. Tetui and E. Okubo, "Robot-assisted rehabilitation using an entertainment robot", Bulletin of Teikyo University of Science and Technology, pp.41-52, 2008 (written in Japanese).
- R. Hayashi and S. Kato, "Importance of interaction in improving stress relief", Information Processing Society of Japan, pp.17-18, 2018 (written in Japanese).
- 10) A. Tanaka and T. Ichimura and T. Iwamoto, "The effect of laughter on the immune function of female university students, "Bulletin of the School of Nursing, Yamaguchi

Prefectural University, pp.121-125, 2003 (written in Japanese).

- 11) Tara L. Kraft and Sarah D. Pressman, "Grin and Bear It: The Influence of Manipulated Facial Expression on the Stress Response" Psychological Science, pp.1372– 1378, 2012.
- 12) https://helpguide.sony.net/aibo/ers1000/v1/ja/contents/ TP0001599279.html (Accessed on Feb. 1, 2020 and written in Japanese).

研究ノート

65

近赤外分光法による日常会話における前頭野の脳賦活反応の計測

川口港*深谷安子**

Frontal brain activation during everyday conversations measured by near-infrared spectroscopy

by

Minato KAWAGUCHI Yasuko FUKAYA

要 旨

先行研究では、ケア提供者 - 高齢者間のコミュニケーションが、業務関連型と生活世界型と呼ぶことのできる2つの型に分類 された.後者はいわゆる日常会話に類似した性質をもつが、介護を必要とする高齢者は会話の時間が少なく、生活の質低下を招 いている可能性がある.本研究では、近赤外分光計測を用いて、2つの会話型で前頭部の賦活に違いが生じるか否かを調査した、 実験協力者は会話課題を10分間ずつ実施した.離散ウェーブレットに基づく多重解像度解析とRunning Correlationの算出が体動、 透過光の過大もしくは過小に伴うノイズ除去のために適用された.周波数とチャンネルの効果を観測するため、会話型間の差を 収集し、二元配置分散分析を適用した.その結果、生活世界型会話を遂行中の酸素化ヘモグロビン濃度および総ヘモグロビン濃 度の平均値は特定の周波数帯で業務関連型よりも有意に高くなることが認められた.そして生活世界型会話の賦活の高さは、補 足運動野付近により顕著に見られた.本研究を通じて、生活世界型の会話は前頭部の賦活をもたらし、ケア提供者--高齢者間の コミュニケーションの在り方を改善することが期待される.

キーワード:近赤外分光法,酸素化ヘモグロビン濃度,コミュニケーション,前頭野

Abstract

A previous study showed that communication between caregiver and older patient/resident is qualitatively divided into two types: task-oriented and life-worldly. The latter type is similar to everyday conversation, but the patient/resident speaks it very shortly, which may induce deterioration of quality of life. We investigate if and how the frontal lobe activations have differed between these two communication types through near-infrared spectroscopy. A participant demonstrated each communication ten minutes. The multi-resolution analysis based on the discrete wavelet transform and running correlation were applied to reject noise derived from body motions, excessive light transmission and insufficient light detection. The difference between communication types was compared by two-way ANOVA. Our results showed that oxygenated and total hemoglobin levels during the life-worldly communication were significantly higher than that during task-oriented communication, relatively high levels of brain activation were found near the premotor cortex. These results suggest that life-worldly communication generates higher activation in the frontal lobe, improving how caregivers communicate with older patients/residents in hospitals and nursing homes.

1 緒 言

近赤外線分光法 (NIRS: Near infrared spectroscopy) は 脳活動を非侵襲的 (non-invasive) に測定する手段の一つで ある. これは組織のヘモグロビン動態を観測するものであり, その原理は, 近赤外線の透過光に対する照射光の強度の比が, 光路長と血中ヘモグロビン濃度変化の積に比例するという修 正 Lambert-beer law に基づく^{10), 21)}. NIRS は機能的核磁気 共鳴 (fMRI: functional Magnetic Resonance) と比べて低拘 束性の点で優れているものの³⁾, 照射プローブと受光プロー ブ間の距離とその変動, 体動, 脈拍などのノイズが混入する 可能性がある. これらへの対策として, ウェーブレット変換 に基づく時間-周波数解析の適用や²¹⁾, 体動に伴う突発的な 外れ値の除去について指針が示されている^{2), 4)}.

NIRS は言語流暢性テストなどの知能検査における脳賦活 や精神疾患の診断への有用性が研究されている^{16),18),20)}.し かしこれらは、検査を指向した、限定された非日常的なプロ トコルに沿った実験状況、例えば短時間の課題を繰り返し行 うといった状況における脳賦活の程度を調査したものが多 く、より日常的な会話に近い状況において脳活動の賦活を定 量的に測定した研究は未だない.また、これを高齢者と介護 者とのコミュニケーションに関する研究に応用した検討もな されていない.

対人コミュニケーションの構造を明らかに方法としては, 認知・心理学的手法やシンボリック相互作用論的手法に大別 される¹⁹⁾.前者は概ね実験室でなされる実験を通じて、普遍 的な構造を見出すことを指向している.シンボリック相互作 用論の立場では、会話の参与者は自身の置かれた状況に相応 しい振る舞いを行うことについて着目する. この現象に対し て定量的に分析することは難しい、その代わりに質的な研究 手法としての会話分析14)の知見が20世紀から蓄積されてき ている. 医療・看護コミュニケーションに関する研究事例と しては、患者(高齢者)のニーズを汲み取るか、もしくは適 切な業務遂行を行えるかを指向する. その中で患者中心コ ミュニケーションは患者の自発的な意思決定を促すことを念 頭に置く.参与者の行動の記録や逐語録に基づく分析,看護 職の技能向上のための尺度開発といった研究が行われる. 一 方で、日常会話については従来の研究がとりこぼしていた可 能性がある.国内の要介護高齢者の発語時間は、1日にわず か4分程度にすぎないことが報告されている5). その一因と しては、それは社会的な交流の少なさを反映するとともに、 その大半を占めるケア提供者との会話が、もっぱらケア提供 者にとっての業務に関連した話題になってしまうためであ る. 先行研究では、介護施設の利用者および介護職のコミュ ニケーションを観察し、業務関連型と、業務に関与しない日 常会話(生活世界型)とに二分した.なお生活世界という語は、 現象学において言及される概念である^{12),13)}が、これらの知 見に対応するために命名された.またこの生活世界型には 社交的な言葉のかけあい¹⁾ (phatic communication, sall talk) といった要素を含むが、エピソード記憶の想起とその表出と

してのナラティブの形成という側面も有する.

以上の経緯から、本研究では高齢者とケア提供者間でなさ れる2種類の会話に対し、前頭部の賦活の程度に差が認めら れる否かを明らかにすることを目的とした.その準備として、 会話中の信号からノイズの除去が従来研究で示される手法の 適用で有効であるか否かを検証した.

2 方法

2.1 実験協力者

首都圏在住の健康な19歳から24歳の若年者および65歳以 上の高齢者を対象とした.若年者群はA大学の学生に対し て研究参加の募集を行った.高齢者については,地域の自治 会,スポーツサークル,清掃・保守点検会社を通して募集した. 一方で「認知症高齢者の日常生活自立度判定基準」 II a 以上 の者,張力喪失および全失語を有する者は除外した.

2.2 実験機材

近赤外線分光計測(NIRS)装置としてNIRO-200NX(浜 松ホトニクス)を使用した.4本の照射プローブと9本の受 光プローブから16チャンネルの信号を測定するようにして, 最前列の中央を国際10-20法におけるFpzの位置として,最 前列の辺がT3-Fpz-T4に沿うように左右対称に配置した²²⁾. サンプリング周波数は10 Hzとし,チャンネルごとに酸素化 ヘモグロビン濃度OHbµmol/L,脱酸素化ヘモグロビン濃度 HHbµmol/Lを記録した.また,OHbとHHbの和として総 ヘモグロビン濃度cHbも併せて記録した.図1にプローブの 配置を示す.数字はチャンネル番号であり,図中の丸と正方 形はそれぞれ照射・受光プローブの位置を示す.光路長は, 成人頭部としてプリセットされた値である18cmとした.ヘ モグロビン濃度の測定とともに,参与者および装置の操作を 俯瞰的に捉えるように音声つきビデオカメラで録画した.

2.3 実験の手続き、人権・倫理に関する配慮

実験協力者の着座とともに、NIRS プローブの装着を行った.装着後に,面接者役と約1mを隔てて対面の姿勢をとり, 10分間の会話課題と3分間の安静を1セットとして2セッ

Fig.1 NIRS optode positioning

ト実施した.

会話課題には「業務関連型(TOC: Task-oriented communication)」と「生活世界型(LWC: Life-worldly communication)」があり、どちらを先に行うかを半々となるようランダムに振り分けた.ここで、「業務関連型」とはケア提供者がその職務遂行を目的として産出する問いかけに対して実験協力者が回答するといった、概ね一問一答形式でなされる会話であり、「生活世界型」は過去の思い出、食事、趣味、家族、友人・知人について等、高齢者にとっての生活世界を構成する話題を有し、適切な相槌やケア提供者役の傾聴の姿勢によって会話が維持・発展するものとした⁶.

本研究は、関東学院大学人に関する研究倫理委員会による 承認のもと実施された(H2017-2-3).実験参加候補者には 文書による説明を行い、同意書への署名をもって同意の取得 とした.その結果として、高齢者43名、若年者24名が実験 に参加した.

2.4 データの分析

NIRS 計測装置は測定中に受光量の過大もしくは過小の時 にエラーを返す. エラーとなった時刻については分析から除 外した. そして記録されたヘモグロビン濃度の時系列は、そ れに加えて、脈拍、体動、およびプローブの変動に由来す るノイズが混入している可能性があるため、以下の処理を 行って会話に伴う賦活を反映する成分を抽出した.まず離散 ウェーブレット変換に基づく多重解像度分析 (MRA: Multi resolution analysis) を適用した²¹⁾. ウェーブレット基底関 数として7次 Daubechies wavelet (db7) を選定した. MRA による分解された成分を再構成した波形と元波形を比較する ことで検出精度が得られるが、前頭部への NIRS を適用した 先行研究23) において、次数を7以上にしても精度に変化が 見られなかったとの知見から、本研究でも db7を採用した. ヘモグロビン濃度時系列は10個の異なる中心周波数 f_{c(i)} をも つ信号に分解された (i=1,2, ..., 9, 10). 図2 (a) に, あるチャンネルにおいて記録された酸素化ヘモグロビン濃 度に対して MRA を適用した例を示す. 最上段は原波形であ り、2段目(d1)以下が MRA 適用によって分解された成分 である. 各成分の中心周波数はサンプリング周波数と照合し て求めることができ、d1の中心周波数は3.46 Hz, i番目の成 分 di の中心周波数は3.46×2⁽¹⁻ⁱ⁾ Hz となる. また, Running Correlation (RC) を算出した²⁾. ある時刻 t における RC (t) は、時間窓 τ を用いて $t - \tau$ から $t + \tau$ の範囲における OHb とHHbの相関係数として定義される.これは酸素化ヘモグ ロビン濃度の上昇と同時に脱酸素化ヘモグロビン濃度の上昇 が見られた場合には体動に由来するものである可能性が高い という着想に由来する. 文献に倣い τ =5s に設定し, RC>0.2 となる時刻でのヘモグロビン濃度を分析対象から除外した. 一例を図2(b)に示す.そしてヘモグロビン濃度をzスコ ア化し、絶対値が1を上回るものについても外れ値として分 析対象から除外した⁴⁾. 図2 (b) は、1人の実験協力者に

おいて本実験を行った時の,1つのチャンネルで記録された *OHb*(上・中断,太線),*HHb*(上・中断,細線)ならびに *RC*(下段)を示す.

MRA によって分解された成分のうち,会話タイプ間のへ モグロビン濃度の隔たり *D_i*⁽⁾ を次式によって正規化して評価した.

$$D_{i}^{(j)} = \frac{Hb[LWC]_{i}^{(j)} - Hb[TOC]_{i}^{(j)}}{\left|Hb[LWC]_{i}^{(j)}\right| + \left|Hb[TOC]_{i}^{(j)}\right|}$$

 $Hb[x]^{(j)}$ は j 番目のチャンネルでの、半波整流された OHb と cHb,および HHb の10分間の時間平均値である。各成分にお いてとりうる値が異なるために、上式のように分母をおき、 $-1 < D_i < 1$ となるように正規化を行った。HHb については 半波整流を施さずに平均を求めた。頭部 NIRS を用いた研究 では、課題中に HHb の減少がみられるためである。

D_iの平均値の変化が中心周波数によるものなのか,ある いはチャンネルによるものなのかを比較検討するために二元 配置分散分析を行った.その結果として周波数fによる主効 果,チャンネル ch による主効果,ならびに交互作用につい て,それぞれ検討統計量F,効果量ŋ,およびp値を表記する. さらに D_iが中心周波数の変化に対して極大になり,かつ妥 当であることを確認した後に,その成分に対してヘモグロビ ン濃度値の平均値を対応のあるt検定を用いて比較した.有 意水準を5%とする.各会話タイプのヘモグロビン値ならび に検定結果としてのtおよびp値の分布を,頭皮上の位置と 照らし合わせて,線形補間を用いてマッピング画像を作成し, 評価した.

3 結果

3.1 実験協力者

高齢者のうち3名は、実験の全体にわたって受光量の過大 もしくは過小が見られたために、分析対象から除外された. その結果、高齢者40名(65~83歳、平均71.7、標準偏差4.97) が分析対象となった.これに若年者24名(19~24歳、平均 21.5、標準偏差1.06)を加えた合計64名が分析対象となった.

3.2 中心周波数に対する会話タイプ間の賦活度の差の変化

平均 *OHb* に対して D_i を算出した結果を図**3**に示す. 図**3** (a) は16チャンネル×実験協力者数のサンプルに対して平 均をとったものであり, 図**3**(b) はチャンネルごとに分割 して算出した結果である. 図**3**(a) から,中心周波数が0.216 Hz および0.432 Hz において極大となった.分散分析の結果, 周波数およびチャンネルの主効果が認められ,交互作用は 認められなかった(周波数について, F_f (9,10880)=3.54, $\eta_f^2=2.90\times10^{-3}, p_f=2.11\times10^{-4}, チャンネルについて,$ F_{ch} (15,10880)=6.27, $\eta_{ch}^2=8.50\times10^{-3}, p_{ch}=1.98\times10^{-13},$ 交互作用について, $F_{interaction}$ (135,10880)=0.656, $\eta_{interaction}^2=$ 8.10×10⁻³, $p_{interaction}=0.999$). すなわち, チャンネルによっ て程度に違いはあるものの, 周波数に依存する特性を呈し,

(a) Decomposition of oxygenated hemoglobin concentration (*OHb*) using discrete wavelet transform

(b) Running correlation between oxy- and deoxygenated hemoglobin concentration

Fig.2 Noise rejection

かつ0.216 Hz および0.432 Hz 付近を極大とする傾向が観測 された. この極大となった周波数帯は,話者交替¹⁴⁾のリズ ムに概ね近いことから妥当と言える. 同様に平均 cHb に対 しても D_i を算出した. 結果を図4に示す. 平均 OHb と同様 な傾向が観測された(周波数について, F_f (9,10880) = 4.01, η_f^2 =3.20×10⁻³, p_f =3.90×10⁻⁵, チャンネルについて, F_{ch} (15,10880) = 8.35, η_{ch}^2 =1.12×10⁻², p_{ch} =2.39×10⁻¹⁹, 交互作用について, $F_{interaction}$ (135,10880) =0.711, $\eta_{interaction}^2$ = 8.80×10⁻³, $p_{interaction}$ =0.995).

一方で、平均 HHb に対して D_i を算出すると、相対的に平 坦な特性が観測された. その結果を図5 に示す. 分散分析を 行った結果からも明らかに、周波数およびチャンネルの主効 果は認められなかった. また、交互作用も認められなかった (周波数について、 $F_f((9,10880) = 1.72, \eta_f^2 = 1.40 \times 10^{-3}, p_f = 7.87 \times 10^{-2}, f_f + v > ネ ルについて, <math>F_{ch}(15,10880) = 1.25, \eta_{ch}^2 = 1.70 \times 10^{-3}, p_{ch} = 2.23 \times 10^{-1}, 交 互 作 用 に つ い て,$ $F_{interaction}(135,10880) = 1.17, \eta_{interaction}^2 = 1.46 \times 10^{-2}, p_{interaction} = 0.0841). すなわち、HHb からは会話タイプ間の比較は困$ 難であると判定された.

3.3 会話タイプ間の賦活度の比較

中心周波数が0.432 Hz の成分に着目して分析を行った. 詳細は別報を参照されたい⁷⁾.本稿ではそのうちの,平均 *OHb* に対する会話タイプ間の比較結果をマッピング表現し たものを図6に示す.図6(a)は業務型,図6(b)は生 活世界型の平均 *OHb* である.

ただし,会話中の時間平均値から安静時における時間平 均値を減じた OHb をサンプルしたものを表した.すなわち, いずれの会話タイプにおいても負の値をとらなかったことか ら,安静時よりも高い賦活が確認された,そして生活世界型 の方が,いずれのチャンネルにおいても高いヘモグロビン濃 度を呈している傾向が観測された.チャンネルごとに平均値 を比較するため,t検定を適用した結果が図6(c)(d)に示す. 図6(c)は検定統計量 t(63)値,図6(d)は両側 p 値を示 す.各チャンネルで平均 OHb 値を比較すると,いずれのチャ ンネルにおいても生活世界型の方が有意に高かった.さらに

近赤外分光法による日常会話における前頭野の脳賦活反応の計測

(b) Results for each channel

Fig.3 Differences in mean OHb levels between communication types as a function of central frequency

(b) Results for each channel

Fig.4 Differences in mean total hemoglobin concentration (*cHb*) levels between communication types as a function of central frequency

(a) Averaged value 0.4 01.0.2 5-0.2 -0.4 0.4 91: 0.2 91: 0.2 -0.2 -0.4 0.4 0.2 0 -0.2 -0.4 C1.0.2 0.4 0.2 0.2 ch.14 -0.4 0.4 6.0.2 5.0 -0.2 -0.4 0.4 0.2 -0.2 -0.4 0.4 0.4 0.2 ch.15 ch.11 ch.13 0.2 -0.4 0.4 5 0.2 5 0 -0.2 -0.4 0.4 04 0.4 0.2 0 =0.2 -0.4 0.4 0.2 46 ch.8 -0 0.4 5 0.2 0.4 9 0.2 0.4 5 0.2 0.4 0.2 -0.2 -0.4 ch.3 -0.2 -0.4 10-3 0 -0.2 -0.4 -0.2 -0.2 -0.4 10 10 10-1 10 10-1 10 10⁻¹ *f*_[Hz] $f_{\rm c}[{\rm Hz}]$ fc[Hz] fc[Hz]

Fig.5 Differences in mean deoxygenated hemoglobin concentration (*HHb*) levels between communication types as a function of central frequency

(a) Averaged *OHb* during the taskoriented conversation

(b) Averaged *OHb* during the lifeworldly conversation

(c) t (63) value

(d) p- value

Fig.6 Comparison of mean OHb levels by communication type.
その差は,前列(ch.9~16)よりも後列(ch.1~8)の方が顕 著である傾向が観測された.

4 考 察

会話を行う被験者に対して前頭部への近赤外線分光計測を 行い,比較的長時間にわたる計測において既存のノイズの除 去技術が適用可能か否かを検討し,その上で会話型間の賦活 の程度を比較した.

MRA によって分解されたヘモグロビン濃度の各信号に対 して、会話型間の差を算出した.その結果、平均 OHb およ び平均 cHb において中心周波数に依存する傾向が観測され, 特に0.216 Hz および0.432 [Hz] 帯の成分で顕著な差が認め られた(図3,図4),これは以下の理由によって妥当なも のと考えられる. まず, この周波数帯 (d4, d5) は会話の 話者交替のリズムに概ね従う. これよりも高い周波数帯は脈 拍やうなずきを含んでいると考えられる. ただし、うなず きのようなプローブと頭皮の間の距離が変動する場合には, OHbと HHb が同時に増減し, RC が高くなる. このような姿 勢変化に伴うノイズは RC によって除去され、会話型間の差 も低減されたものと考えられる.一方でこれより低い周波数 帯は、呼吸もしくはプローブが徐々にずれていくことに由来 する成分であり、会話型に差をもたらさなかったものと考え られる. 平均 HHb に対しては, 会話型間の差はいずれの帯域, チャンネルにおいても認められなかったが、通常、課題中の 脳の HHb の変化は相対的に小さく^{17),21)},本研究においても このことが原因でもたらされた結果と考えられる.

帯域通過された OHb の平均値に対して, 会話中の賦活を 評価したところ, まずいずれの会話においても安静時よりも 高かった. 言語流暢性課題¹⁶⁾ や作業記憶課題¹⁵⁾ などの課題 中に頭部への NIRS を測定した事例と同様に, 二人でなされ る会話においても賦活のための課題として機能することが確 認された. 会話型間の比較では, 生活世界型の方が業務関連 型よりも高い賦活が認められた(図6). NIRS のチャンネ ルは少なくともブロードマン10野を覆い, 作業記憶やエピ ソード記憶に関する処理を担う⁸⁾. 業務関連型の会話では, 面接者の問いかけが閉じた質問が多く, 開いた質問であって も数量的な回答に限定されるのに対し, 生活世界型では開い た質問が多いだけでなく, 実験協力者は面接者の適切な相槌 によって過去のエピソードを長時間にわたって披露されるた めにもたらされた結果と考えられる.

チャンネルについて言及すると、鼻腔から後頭結節、左右 耳介前点までの頭皮上の距離を基準においた国際10-20法に したがう脳波計測と異なり、頭囲によらず固定された間隔で チャンネルを配置する本研究の NIRS では、チャンネルが覆 う領域に個人差がある。特に、最前列の中央(Fpz)から離 れるほどずれる。それにも関わらず、後列の方が顕著な差が 認められた。その原因があるとすれば、他者への共感¹¹⁾ や 運動に関する意思形成²⁴⁾ に関与する44野、あるいは言語処 理⁹⁾ を担う44、45野、運動の随意的な選択や準備を担う6野 の賦活を反映することが考えられる.すなわち生活世界型会 話の方が実験協力者は面接者の言動や表情を見ながら適切に 言葉を選ぼうとする場面が多い(時間が長い)ためにもたら された結果であると考えられる.

本稿での結果は、年齢および性別の別なく分析を行ったも のである.これらの比較結果については別稿を参照されたい⁷⁾.

5 おわりに・今後の課題

本研究では高齢者とケア提供者間でなされる2種類の会話 に対し,NIRS による前頭部の脳機能計測を行った.その結 果,課題に依存した周波数帯において,より日常会話に類似 した形でなされる会話において,高い賦活が認められた.

本研究を通じて、日常会話を対象とする生体計測について 複数の課題を見出すに至った. 会話型についての分類は、 医 療コミュニケーションに関する従来研究や高齢者介護施設に おける実情に関する調査に照らし合わせて、業務関連型か否 かを質的に分類したものであった. 定量化可能な変数として は、発語の回数および時間、参与者への視線配布回数や滞留 時間、想起される記憶の時制などが挙げられるが、実験協力 者がそれぞれに個性をおっている以上、これらを統制するこ とに意義を見出すことは難しい. ただし, 面接者の属性や会 話中の態度が与え得る影響については検討の余地がある.本 研究で実施した時間-周波数分析から観測された結果は、話 者交替のリズムにヘモグロビン濃度変化が連動するもので あったが,評価の際に時間平均を求めたために,位相に関し ては未だ不明である. 例えば, 脳波の誘発電位の特性を得る ように、会話において表出される行動の周りでヘモグロビン 濃度の変化と行動の遷移の変化を解析するといった検討が今 後の課題である. その他にも疲労の客観的評価等を通じて、 適度な日常会話なあり方を策定できる可能性が挙げられる.

謝 辞

本研究は JSPS 科研費(17K12427),2018年度理工/建 築学会研究補助費の助成を受けたものである.

本研究の遂行にあたり,株式会社関学サービスおよび本学 学生に協力をいただいたことについて感謝の意を表する.

文 献

- Justine Coupland, Nikolas Coupland, and Jeffrey D. Robinson: "How are you?": Negotiating phatic communion, Language in Society, 21 (2), 207-230, 1992.
- 2) Xu Cui, Signe Bray, and Allan L. Reiss: Functional near infrared spectroscopy (NIRS) signal improvement based on negative correlation between oxygenated and deoxygenated hemoglobin dynamics, NeuroImage, 49(4), 3039-3046, 2010.
- 3) Simone Cutini, Sara B. Moro, and Silvia Bisconti: Functional near Infrared Optical Imaging in Cognitive Neuroscience: An Introductory Review, Journal of Near

Infrared Spectroscopy, 20(1), 75-92, 2012.

- 4) Tomer Fekete, Denis Rubin, Joshua M. Carlson, and Lilianne R. Mujica-Parodi: The NIRS Analysis Package: Noise Reduction and Statistical Inference, PLoS ONE 6 (9): e24322, 2011.
- 5) Yasuko Fukaya, Takanori Kitamura, Sachiyo Koyama, Kanako Yamakuma, and Shinobu Sato: Analysis of Utterances by Older Persons in 'Life-Worldly' Communication with Caregivers in Japan, Journal of Nursing & Care, 5, 367, 2016.
- 6) Yasuko Fukaya, Takanori Kitamura, Ritsuko Wakabayashi, and Minato Kawaguchi: Development of Life-Worldly Communication Scale for Older Persons: A Pilot Study, Journal of Health and Medical Sciences, 2 (4), 1-16, 2019.
- 7) Yasuko Fukaya, Minato Kawaguchi, and Takanori Kitamura: Does Everyday Conversation Contribute to Cognitive Functioning? A Comparison of Brain Activity During Task-Oriented and Life- Worldly Communication Using Near- Infrared Spectroscopy, Gerontology & Geriatric Medicine, 6, 1-14, 2020.
- 8) Sam J. Gilbert, Stephanie Spengler, Jon S. Simons, J. Douglas Steele, Stephen M. Lawrie, Christopher D. Frith, and Paul W. Burgess: Functional Specialization within Rostral Prefrontal Cortex (Area 10) : A Metaanalysis, Journal of Cognitive Neuroscience 18(6), 932-948, 2006.
- 9) Barry Horwitz, Katrin Amunts, Rajan Bhattacharyya, Debra Patkin, Keith Jeffries, Karl Zilles, and Allen R Braun: Activation of Broca's area during the production of spoken and signed language: a combined cytoarchitectonic mapping and PET analysis, Neuropsychologia, 41 (14), 1868-76, 2003.
- Yoko Hoshi: Functional near-infrared spectroscopy: current status and future prospects, Journal of Biomedical Optics, 12(6), 062106.
- Taeko Ogawa and Michio Nomura: Using NIRS to Investigate Social Relationship in Empathic Process. In Theophanides Theophile (Ed.) Infrared Spectroscopy -Life and Biomedical Sciences, IntechOpen, 67-78, 2012.
- 12) 奥村隆:社会科学における「生活世界」の概念とその射程-シュッツ、ハバーマスからフッサールへー、社会学評論、39(4)、406-420、478、1989. https://doi.org/10.4057/jsr. 39. 406.
- Lucia Ruggerone: Science and Life-World: Husserl, Schutz, Garfinkel, Human Studies, 36, 179-197, 2013.
- 14) Harvey Sacks, Emanuel A. Schegloff, Gail Jefferson:A Simplest Systematics for the Organization of Turn

Taking for Conversation. In Jim Schenkein (Ed.) Studies in the Organization of Conversational Interaction, 7-55, 1978.

- 15) Hiroki Sato, Noriaki Yahata, Tsukasa Funane, Ryu Takizawa, Takusige Katura, Hirokazu Atsumori, Yukika Nishimura, Akihide Kinoshita, Masashi Kiguchi, Hideaki Koizumi, Masato Fukuda, and Kiyoto Kasai: A NIRSfMRI investigation of prefrontal cortex activity during a working memory task, NeuroImage, 83, 158-173, 2013.
- 16) Martin Schecklmann, Ann-Christine Ehlis, Michael M Plichta, and Andreas J Fallgatter: Functional nearinfrared spectroscopy: a long-term reliable tool for measuring brain activity during verbal fluency, NeuroImage, 43 (1), 147-155, 2008.
- 17) 志村学城(編):近赤外分光法による前頭前野計測―認 知症の早期発見とリハビリテーション方法の評価―,コ ロナ社,2009.
- 18) Masashi Suda, Yuichi Takei, Yoshiyuki Aoyama, Kosuke Narita, Toshimasa Sato, Masato Fukuda, and Masahiko Mikuni: Frontopolar activation during face-toface conversation: an in situ study using near-infrared spectroscopy, Neuropsychologia, 48 (2), 441-447, 2010.
- 19) 末田清子,福田浩子:コミュニケーション学 その展望と 視点 増補版,松柏社,2011.
- 20) Yuichi Takei, Masashi Suda, Yoshiyuki Aoyama, Noriko Sakurai, Minami Tagawa, Tomokazu Motegi, Miho Yamaguchi, Kosuke Narita, and Masato Fukuda: Nearinfrared spectroscopic study of frontopolar activation during face-to-face conversation in major depressive disorder and bipolar disorder, Journal of Psychiatric Research, 57, 74-83, 2014.
- 21) Hitoshi Tsunashima, Kazuki Yanagisawa, and Masako Iwadate: Measurement of brain function using nearinfrared spectroscopy (NIRS). In Peter Bright (Ed.), Neuroimaging - Methods, IntechOpen, 75-99, 2012.
- 22) Martin Verner, Matin J. Herrmann, Stefan J. Troche, Claudia M. Roebers, Thomas H. Rammsayer: Cortical oxygen consumption in mental arithmetic as a function of task difficulty: a near-infrared spectroscopy approach, Frontiers in Human Neuroscience, 7, 217, 2013.
- 23) 柳沢一機,綱島均,丸茂喜高,伊藤誠,稲垣敏之: NIRSを用いた自動車運転時の脳機能計測(運転支援シ ステムによるドライバの負担軽減の評価),ヒューマン インタフェース学会論文誌,14,2,99-108,2012.
- 24) Marius Zimmermann, Ruud G.J. Meulenbroek, and Floris P. de Langeet: Motor Planning Is Facilitated by Adopting an Action's Goal Posture: An fMRI Study, Cerebral Cortex, 22(1), 122-131, 2012.

理工 / 建築・環境学会「研究報告」投稿規程

1. 投稿資格

投稿原稿の著者(連名の場合は、その中の1名以上)は、本学理工/建築・環境学会会員でなければならない.

2. 著作権

理工 / 建築・環境学会研究報告に掲載された論文などについての著作権は、理工 / 建築・環境学会に帰属する.

また、外部から転載・引用の申請があった場合は、本会において検討の上、許可することがある.詳しくは、理工 / 建築・ 環境学会著作権規程による.

3. 論文などの図書館ウェブサイト上での公開

掲載された論文などは、関東学院大学図書館ウェブサイト上に公開する.ただし、データの公開範囲は要旨のみとする. 4. 原稿の種類

原稿は、「研究論文(Research Paper)」、「技術論文(Technical Paper)」、「研究ノート (Research Note)」および「寄書 (Short Article)」とし、理工学または建築・環境学に関連する領域の和文あるいは英文で書かれたものとする.

4.1 研究論文

(1)独創的な研究で、価値ある結論あるいは事実を示唆するものであること。 (2)原稿の長さは、図・表・要旨を含め、原則として刷り上がり12ページ以内とする. (3)要旨は、内容をよく表現している英文300語以内で、本文冒頭に添付する、

4.2 技術論文

(1)理工学および建築・環境学に寄与する技術,設計,実験,試作などに関する事実あるいは結論を示唆するものであること. (2)原稿の長さは、研究論文に準じる、

(3)要旨は、研究論文に準じる.

4.3 研究ノート

(1)速報性を有するか、また論文より内容が少ないものであること. (2)原稿の長さは、図・表・要旨を含め、原則として刷り上がり4ページ以内とする. (3)要旨は、内容をよく表現している英文200語以内で、本文冒頭に添付する.

4.4 寄書

(1)本誌に掲載された記事についての討論、または本誌の関係領域に対する評論であること.

(2)原稿の長さは、図・表を含め、原則として刷り上がり4ページ以内とする.

- 5. 投稿原稿の取扱い
 - 5.1 原稿は、正・副各1部および別途定める指定方法で、理工/建築・環境学会編集委員会(学部庶務課内)に提出する.
- 5.2 原稿は、本投稿規程および投稿の手引き(別紙)に従って書くものとする、
- 5.3 投稿原稿の受理年月日は,編集委員会に提出された時点とする.ただし,原稿の書き方が「投稿の手引き」に従っていな い場合には, 受理しない.
- 5.4 原稿の採否は、編集委員会が決定する.なお、編集委員会は、原稿の内容について訂正を求めることがある.
- 5.5 理工 / 建築・環境学会研究補助費による報告は、「研究論文 | あるいは 「技術論文 | として投稿し、本文の末尾に、「本研究は、 (西暦) 年度理工 / 建築・環境学会研究補助費を受けたものである.」(あるいは英文の場合は, "This work was financially supported by the Society of Science and Engineering/Architecture and Environmental Design, Kanto Gakuin University in XXXX."と明記しなければならない.
- 6. 著者校正

著者校正は、原則として1回とする.なお、この時点で、印刷上の誤り以外の字句訂正は、原則として認めない.

7. 別 刷

別刷は、50部を進呈する。50部以上の希望者は、原稿提出の際に、原稿表紙の該当欄に記入して申し込む。その経費は、 実費を徴収する.

- 8. 掲載後の訂正
 - 8.1 印刷上の誤りについては、著者の申し出があった場合に限り、掲載する.
 - 8.2 印刷上の誤り以外の訂正,追加などは、原則として取り扱わない.ただし、著者の申し出があり、編集委員会がそれを適 当と認めた場合に限り、掲載することがある.

74

9. 規程の改廃

この規程の改廃は,理工 / 建築・環境学会で行う.その後,工学部教授会に報告する.

- 付 則
 - この規程は, 1998年4月1日から施行する.
- 付 則
 - この規程は、2004年4月1日から改正施行する.
- 付 則
 - 1 この規程は、2013年10月2日から改正施行する.
 - 2 前項の改正に係らず、2012年度までの工学会研究補助費については、なお従前の例による.

理工 / 建築・環境学会「研究報告」投稿の手引き

1. 投稿の準備

- 1.1 表紙は、本会所定のものを使用する.
- 1.2 本文の作成は、下記の用紙を使用する.
 (1)ワープロ使用の場合、市販のA4白紙.
 (2)手書きの場合、本会所定の原稿用紙.

2. 原稿の書き方

- 2.1 最近の理工 / 建築・環境学会「研究報告」の体裁を参考にして書く.
- 2.2 文章は簡潔に、原則として当用漢字、現代かな使いで書く.
- 2.3 学術用語は、文部科学省学術用語、または JIS 用語で書く、
- 2.4 単位は、原則として SI 単位を使用する.
- 2.5 ワープロの場合の A4用紙は,縦長・横書きとする.和文の場合は,1ページあたり全角23字×27行(3ページが刷り上がり1ページとなる),字間はベタ(英文字,数字は半角とする)でよいが,用紙左右の余白として50mm 以上を設けること. また,英文(ワープロ)原稿の場合は,A4用紙に適当なフォントで書くものとするが,1ページあたり27行を目安とすること.

3. 原稿の構成および長さ

原稿は、「原稿表紙」、「要旨」および「本文」(場合によっては「付録」も含む)からなるものとする. 原則として、刷り 上がり時の全体の長さは、論文は12ページ以内、研究ノート・寄書は4ページ以内とする. ちなみに、和文では、手書き原 稿用紙8枚、ワープロ原稿用紙3枚、英文ではA4用紙2枚が、それぞれ刷り上がり1ページに相当するので、図表等の刷 り上がり寸法を考慮して、ページ数を見積ること.

4. 原稿表紙

- 4.1 原稿種別:原稿の種類(研究論文・技術論文・研究ノート・寄書)を書く.
- 4.2 和文題名:原稿の内容を的確かつ簡潔に表現する題名であること.例えば,「~に関する研究」などの表現はなるべく避ける. 副題がある場合は,())で括る.また続報の場合は,括弧で括り,(第n報,~)と表現する.
- 4.3 英文題名:和文題目に準じる. "Studies on ~"などの表現はなるべく避ける. 題目中の第1文字および名詞,形容詞, 動詞の第1文字は大文字で書く.
- 4.4 著 者 氏 名:漢字およびローマ字で書き、学外者の場合は「所属学科」の欄に所属機関名を書く.
- 4.5 連 絡 先:原稿に関する連絡に当たるため、なるべく学内者とする.
- 4.6 別刷希望部数:進呈される50部以外に希望する部数を50部単位で記入する.

5. 要 旨

- 5.1 要旨は、本文の内容が理解できるように英文と和文で書く.
- 5.2 要旨は、目的、方法および成果を簡潔に示すものであること.
- 5.3 英文要旨の長さは、研究論文・技術論文で300語以内、研究ノートで200語以内とする.和文要旨は、英文要旨の和訳である.
- 5.4 英文要旨は、A4白紙に次の順序にしたがい、適当なフォントで1ページあたり50字×27行を目安に、ワープロで作成す ること、和文要旨も、これに準じる.
 - (1)論文題名
 - (2)著者名

(3)所属

- (4)要旨内容
- (5)キーワード (5 語以内)

6. 本文

- 6.1 本文の形式は、特に限定しないが、緒言(緒論)および結言(結論)を明確にし、例えば、「1. 緒言」、「2. 理論」、「3. 実験方法」、「4. 結果および考察」、「5. 結言」、次に「文献」、「付録」などの順にする. 研究ノート、寄書についても、 これに準じる.
- 6.2 文中の区分は、ポイントシステムにより明確にし、次の例による.
 - 章 1. 2.
 - 節 1.1
 - 項 1.1.1 1.1.2
 - なお, それ以下の区分は(1), (2), (a), (b), ……などとする.

1.2

- 76
 - 6.3 脚注はなるべく避けること.
 - 6.4 文献について
 - 本文中の記載方法について,参考文献,引用文献は,通し番号を付け,本文の該当箇所に上付き添字¹⁾ または^{2),3)} あるいは⁴⁾ ^{~8)} のように示し、本文の末尾にまとめて記載する.

図表の転載は、原則として原図のまま使用し、図表名の直後に[文献*)より転載]等と記述すること(*は文献番号). ただし、図表の場合、翻訳による引用は認められる.

- 6.5 句読点,括弧,ハイフンなどは,原稿用紙の1コマに書く.新しい行(文節)の初めは,1コマ空ける.
 - 6.5.1 文字および用語
 - (1)文字は黒色とし、手書きの場合には楷書で鮮明に表記する.
 - (2)文章の区切りには, 読点(,)や句点(.)を用い, それぞれ1字分とする.また, 同格の単語を並べる場合は, 中点(.) を使用する.
 - 6.5.2 文字の大きさ

文字の大きさは、本文、図表名および図表内の文字・数字・記号とも10ポイント(14級)前後とする.

- 6.5.3 見誤りやすい文字や記号
 - 印刷や校正時のミスを防止し便宜を図るために、文中および図表の余白部に朱書で以下のように指示する.
 - (1)ギリシャ文字を使用する場合はその箇所に ¥ を,立体活字の場合は 立 を,イタリック活字の場合は (イタ) と 指示する.なお、ゴシック活字は量記号の場合のみとし、 ゴ と指定する.
 - (2)まぎらわしい文字や記号は、カタカナ書きの発音を指示する.
 - [例] ローマ字, ギリシャ文字, 数字の区別:0(オー)と0(ゼロ), r(アール)とγ(ガンマ), l(エル)と1(イ チ), 上ツキ・下ツキの指示, 大文字・小文字の指示など.
- 6.6 本文中で図・表を引用する場合は、Fig.1、Fig.2、 ……, Table 1、Table 2、 ……と表現する.

6.7 数字および数式

6.7.1 数字

(1)数量や序数を表す数字はアラビア数字を使用し、漢字と結合して名称や概数を表す場合は漢数字を使用する.

例:10m, 第4章

三角形,数百例,一条ねじ

一つの,二,三の例,一例をあげると

(2)小数点および桁区切り

小数点は、0.123のように書き、.123のようには書かない. 桁区切りについては、456789のように書き、456,789のよう には書かない.

6.7.2 数式

(1)数式を文中に書く場合には、下記の形式Aに示すように、1行におさまる表記法を用いる.行を改めて数式だけを書く 場合には、できるだけ形式Bを使用する.また、必要に応じて式番号を括弧内に付ける.代数記号は、イタリック体と する.

形式A	形式B
(a+b)/(c+d)	a + b
	c + d

(2)文中に式番号を記載するときは、Eq.(1)、Eq.(2)……のように書く.

6.8 単位・量・数学・化学記号

6.8.1 単位·量記号

単位および量記号は、原則として SI による. ロマン体(立体)とする.

6.8.2 数学記号

数学記号は,「JIS Z 8201」(数学記号)による. ロマン体 (立体)とする.

6.8.3 化学記号

化学記号は万国化学記号による. ロマン体 (立体)とする.

6.9 使用機器,サンプル,試薬等の製造会社名,形式,提供者名などは,謝辞に記載する.

7. 図(写真を含む)および表

7.1 図表の選択

図(写真を含む)および表は、類似のものが重複しないように十分検討し、本文を理解するために必要な代表的なものに 限定するとともに、その内容を本文中で詳細に言及し、読者が十分に理解できるようにしなければならない.指定の図表用 紙に記載すること.

図の描き方は, 原則として「JIS B 0001」および「JIS Z 8310」による.

7.2 図表の内容, 図番, 図名, 表番および表名

- (1)図表は,原則として A4白紙に書き,1枚1図あるいは1表とする.提出されたものが,版下となるので,鮮明な図表を 用意すること.なお,図表のトレースを希望する場合は,編集委員会までその旨連絡すること.この場合の料金は実費を 徴収する.
- (2)図番または表番は英語で記述する.また、図番および表番は、それぞれ Fig.1、…、および Table 1、…のように通し番号 とする.
- (3)図表の内容はすべて英語とする. 図表中の文字もそのまま縮小されて写真製版されるので, 縮小されても最低2mmの高 さになるように,図表中にレイアウト(切り貼りなど)すること.線の太さ,文字の大きさなどに注意して黒インクで描く. 図中の文字・数字・記号などはレタリングガイドを使用するか,ワープロで印字したものを貼り込む.
- (4)図表の刷り上がり寸法は,原則として横6 cm, 13 cm のいずれか2種類とする.希望の刷り上がり横寸法(6 cm あるいは 13 cm)を余白に朱書しておくこと.
- (5)図番および図名は図の下部に、表番および表名は表の上部に書く、
- (6)図表の挿入位置は、本文原稿の右余白に明記する.
- (7)写真は図と同様に扱い、コントラストの明瞭なものを A4白紙に貼付する.カラー写真は刷り上がりは白黒となるが、特にカラーでの掲載を希望する場合は、その旨編集委員会まで連絡のこと.この場合の料金は実費を徴収する.
- (8)不鮮明な図表に対しては、編集委員会から再提出を指示することがある.また、編集委員会の判断で図表のトレースを印 刷所に依頼することがある.この経費は、実費を徴収する.

8. 文献(引用文献・参考文献)

8.1 **文献の選択**

文献は,特に必要とするものにとどめ,一般に公表されていない文献,例えば配布を限定された委員会報告や社内報告な どは,やむを得ない場合を除き文献としない.

8.2 著作者の許諾を得ずに引用できる範囲

執筆しようとする記事のなかで,他の著作物(文献)を引用する際は、以下の二つの条件を同時に満足する場合を除き、 原則として事前に当該文献の著作者の許諾を得なければならない.

- (1)自分の著述が〈主〉で、引用部分が〈従〉である場合.
- (2)引用の目的が公正な範囲を逸脱していない場合.すなわち,自分の意見を補強したり,他人の意見を批評する等の目的で 引用する場合.

8.3 文献を引用・参考にする際の履行義務

他の著作物を引用・参考するにあたっては、許諾の必要性の有無に拘らず、以下の事項を順守すること.

(1)出所(書誌事項)を明示すること.この際,連名の著作者を一人で代表させたり,題目を省略したりすることは,著作者 人格権の立場から好ましくない.

(2)引用箇所を明確にすること. ただし, 要約, 翻訳による引用は認められる.

(3)図表の転載は原則として原図のまま使用し、図表名の直後に〔文献*)より転載〕等と記述すること

(*は文献番号).ただし、図表の場合、翻訳による引用は認められる.

8.4 **文献の記載方法**

(1)雑誌の場合

著者名:題目,雑誌名(省略不可),巻,号,ページ(例えば ppX-Y)(西暦発行年)の順に記載し,著者名は連名者も含めて全員の姓名(フルネーム)を記載する.

[例]

1) 設計太郎: CAD 設計論,設計工学,23,12, pp11-18 (1994).

2) Boyd, J., Jones, P. and Raimondi, A. A. : Bearing Theory in Analysis and Design of Journal Bearings, J. Appl. Mech., 73, 2, pp298-315 (1951).

78

(2)書籍の場合

著者名:書籍名,ページ(例えば ppX-Y),発行所,(西暦発行年)の順に記載する.

[例]

1) 製図花子:機械設計製図の実際と理論, pp132-145, 川三書房, (1978).

2) Douglas, R. A. : Introduction to Solid Mechanics, pp53-60, Wandsworth Pub. Co., (1963).

9. 付録

本文中に入れると論旨が中断したり、煩雑になる事柄は、付録として「文献」の後に入れる.付録をつける場合は、本文中 に付録に記載したことを述べる.

付録に出てくる図表および本文とは関係のない数式は、本文とは独立した図・表・式番号をつける. 例えば、Eq. (A-1)、 Fig. A-1, Table A-1のようにする.

10. 原稿の提出

表紙や内容を確認した上で,正・副各1部(表紙,本文,図,表,英文要旨,和文要旨)を提出し,かつ,指定のメールアドレスへWordデータをもって提出する.

付則

この手引きは、1998年4月1日から施行する.

付則

この手引きは、2004年4月1日から改正施行する.

付則

この手引きは、2013年10月2日から改正施行する.

研究報告 Vol. 64 (通巻111号)

 2021年3月1日 印刷・発行 ©

 編集・発行
 関東学院大学理工/建築・環境学会

 50236-8501
 横浜市金沢区六浦東1丁目50-1

 ☎045-786-7096

印刷・製本 株式会社ポートサイド印刷

JOURNAL OF TECHNOLOGICAL RESEARCHES

Society of Science and Engineering/Architecture and Environmental Design, Kanto Gakuin University

Vol. 64 March 2021

CONTENTS

kura ONOUE, Yasushi SASAKI, Takeshi OGUCHI, Akira IIMURA, Sho NOGUCHI, Akira KAWATA, Kazuyoshi HIGASHI: Morphological	Yasushi SASAKI, Tsugito YAMASHITA: Effect of Electrode Compression on the Performance of Sealed Alkaline Storage Cell ······39
by food additives 1	Kentaro TAKAHASHI, Minato KAWAGUCHI: The effect of hydrogen inhalation on the biological functions of long distance runners unusual 45
SAKANE, Hikaru TSUMITA, Taiti SAKAA, Akira SAKANE, Hikaru TSUMITA, Taiki KIKUCHI, Yuki NANBU: Investigation of molecular mechanisms of associative learning of the earthworm 7	Yuka OHTANI, Takeshi KITAHARA, Yosuke KONO, Kazutoshi NAGATA: Seismic performance of corroded steel bridge piers at subjected to simulated motions
roshi NAKAJIMA: Precise measurement of rare element abundances in remnants of core- collapse supernova to understandings of its explosion mechanism11	Ryo YAMAGUCHI, Tohru KANADA, Kai OHSAKI: Fundamental development of motion control program for dog-type robot "aibo" to improve therapy/healing effect
roshi NAKAJIMA, Hikari KASHIMURA: Development of signal processing electronics for X-ray CCD camera onboard the X-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM)17	Minato KAWAGUCHI, Yasuko FUKAYA: Frontal brain activation during everyday conversations measured by near-infrared spectroscopy65
asuro FUNAKI: On the theory of nuclear cluster structure ·····23	
omoyuki TAKADA, Shouta NAITOU, Yuu TAKANASH, Akio MOCHIDA, Shohei YAMAGUCHI, Akira HASHIMOTO, Tomoyasu HIRAMATSU, Kazunori MATSUI: Formation	

- Cu_2O Crystallites on Copper Surfaces Immersed
- in Aqueous Solutions of N-Isopropylacrylamide

and Humidity Sensing Properties of CuO and

and Ammonia -------33