



## 室蘭工業大学紀要 第69号 全1冊

メタデータ	言語: eng 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2020-03-23 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/00010184">http://hdl.handle.net/10258/00010184</a>



ISSN 1344-2708

No. 69 Mar. 2020

**MEMOIRS**  
of  
THE MURORAN  
INSTITUTE OF  
TECHNOLOGY

MURORAN INSTITU  
INSTITUTE OF TEC  
OF TECHNOLOGY  
TECHNOLOGY MU  
MURORAN INSTITU  
INSTITUTE OF TEC  
OF TECHNOLOGY  
TECHNOLOGY MU  
MURORAN INSTITU  
INSTITUTE OF TEC  
OF TECHNOLOGY  
TECHNOLOGY MU

室蘭工業大学  
**紀 要**

第69号 令和2年3月

MURORAN HOKKAIDO  
JAPAN

目 次

依 頼 論 文

特 集：平成30年北海道胆振東部地震災害に関する調査・研究

序文	木幡 行宏	1
北海道胆振東部地震による地盤災害の要因に関する調査	木幡 行宏	3
北海道胆振東部地震災害調査報告	後藤 芳彦	9
平成30年北海道胆振東部地震で発生した斜面崩壊の特徴と地盤工学的考察	川村 志麻, 岸田 航平	13
北海道胆振東部地震における胆振・日高地方の建物の被害調査結果	高瀬 裕也, 永井 宏, 溝口 光男	21
北海道胆振東部地震における災害廃棄物発生原単位推定	吉田 英樹	37
北海道胆振東部地震後の生徒への継時的心身影響調査	前田 潤	41
Energy Cooperation in Battery-Free Wireless Communications with Radio Frequency Energy Harvesting	He LI, Kaoru OTA and Mianxiong DONG	47



## 投稿論文

### ○学術論文

German Japanese Cultural Comparison of Breakfast Scenes in Films .....	Margit KRAUSE-ONO	61
徳島方言における「ダロ」「ダー」「デ」「デー」について .....	島田 武	71
白金ナノ粒子を用いた電界効果トランジスタ型センサの水素応答特性 .....	福田 永, 夢田 芳広	77



CONTENTS

**Invited Papers**

**Specials : Survey and research on the disaster due to 2018 Eastern Hokkaido Iburi Earthquake**

Preface .....	1
<i>Yukihiro KOHATA</i>	
Survey on Factors of Geotechnical Disaster due to 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake .....	3
<i>Yukihiro KOHATA</i>	
Survey Report of the Iburi-Tobu Earthquake Disasters .....	9
<i>Yoshihiko GOTO</i>	
Slope failures over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake and its evaluation .....	13
<i>Shima KAWAMURA and Kohei KISHIDA</i>	
Field Survey Results of Building damage in Iburi and Hidaka Regions by 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake .....	21
<i>Yuya TAKASE, Hiroshi NAGAI and Mitsuo MIZOGUCHI</i>	
Survey of disaster waste treatment and disposal in Hokkaido .....	37
<i>Hideki YOSHIDA</i>	
The Longitudinal Research of Students' Psychosomatic Influence after Hokkaido East Iburi Earthquake in 2018 .....	41
<i>Jun MAEDA</i>	
Energy Cooperation in Battery-Free Wireless Communications with Radio Frequency Energy Harvesting .....	47
<i>He LI, Kaoru OTA and Mianxiong DONG</i>	

## Papers

### ○Article

German Japanese Cultural Comparison of Breakfast Scenes in Films .....	61
<i>Margit KRAUSE-ONO</i>	
On "Daro", "Daa", "De", and "Dee" in the Tokushima dialect .....	71
<i>Takeshi SHIMADA</i>	
Response to Hydrogen in Field-effect Transistor Sensor with Platinum Nanoparticles .....	77
<i>Hisashi FUKUDA and Yoshihiro TADA</i>	

# 特 集



## 序 文

近年、わが国においては、海溝型地震や直下型地震に代表される内陸地震が頻発している。記憶に新しいところでは、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震があり、マグニチュード 9.0 の巨大地震となって、津波による激甚災害をもたらした。また、2016 年 4 月 14 日及び 4 月 16 日に発生した熊本地震では、マグニチュード 6.5、7.3 で、ともに震度 7 を記録し、これまで経験したことがない二つの断層帯が連動することで発生した連動型地震であった。わが国で死者千人以上となる「国難」災害は、西暦 800 年代の富士山・貞観大噴火、貞観地震、仁和南海地震の 3 連動、1700 年代の元禄地震、宝永地震、富士山宝永噴火の 3 連動が記録されている。地球規模では、マグニチュード 8.0 以上の巨大地震の発生後、1 年以内に火山の大噴火が発生していることから、先の地震に引き続き、今後、富士山噴火と南海（東南海）地震（3 連動）あるいは首都圏直下型地震、富士山噴火、南海（東南海）地震（4 連動）の発生が懸念されており、さらには、大規模な高潮・洪水・斜面崩壊が複合災害の形で来襲する危険性が増加している。したがって、災害対策においては、従来の被害先行型から対策先行型への変革が、喫緊の課題となっている。

近年の北海道における巨大地震は、1968 年十勝沖地震（三陸沖北部を震源、マグニチュード 7.9、最大震度 5：函館市、苫小牧市、浦河町、広尾町など）、1993 年釧路沖地震（釧路市南方沖を震源、マグニチュード 7.5、最大震度 6：釧路市）、1994 年北海道東方沖地震（北海道根室沖約 200 km を震源、マグニチュード 8.2、最大震度 6：釧路市、厚岸町）、2003 年十勝沖地震（北海道襟裳岬東南東沖 80 km を震源、マグニチュード 8.0、最大震度 6 弱：新冠町、静内町、浦河町、鹿追町、幕別町、豊頃町、忠類村、釧路町、厚岸町）などのように、ほとんどが海溝型地震であるが、1993 年北海道南西沖地震（北海道奥尻郡奥尻町北方沖の日本海海底を震源、マグニチュード 7.8、最大震度 6：奥尻町（推定））は、日本海側で発生した地震としては、明治以降、最大規模の地震であり、津波や火災により、死者 202 名、不明者 28 名となる大規模災害となった。この地震は、サハリンから新潟沖に繋がっている日本海東縁変動帯の奥尻海嶺直下で発生したとされ、海溝型地震ではなく、海底の活断層によるものとされている。

一方、2018 年北海道胆振東部地震（北海道胆振地方中東部を震源、マグニチュード 6.7、最大震度 7：厚真町鹿沼）は、明治以降、北海道では初めて内陸で発生した直下型の大規模地震であり、200 m にわたる斜面の崩壊や長さ約 1000 m、幅約 500 m にわたる尾根部が約 500 m 滑動するという大規模な地すべりが発生し、死者 43 名となる甚大な災害となった。

本紀要は、2018 年 9 月の北海道胆振東部地震による災害について、本学、もの創造系領域社会基盤ユニット、建築環境学ユニット、しくみ解明系領域、ひと文化系領域に所属する教員のうち、本学で公募された「平成 30 年度 北海道胆振東部地震災害緊急調査支援補助事業」に採択された地盤工学分野、災害廃棄物工学分野、建築構造工学分野、情報ネットワーク分野、臨床心理学分野の調査研究による研究成果を論文として報告したものである。2018 年 9 月北海道胆振東部地震で何が起きていたのかを、多角的視野から全体像が把握できるものと確信している。今後の地震対策の一助になれば幸いである。

もの創造系領域社会基盤ユニット  
木幡 行宏

## 北海道胆振東部地震による地盤災害の要因に関する調査

木幡 行宏\*<sup>1</sup>

(原稿受付日 令和元年 12 月 23 日 論文受理日 令和 2 年 2 月 20 日)

Survey on Factors of Geotechnical Disaster due to 2018  
Hokkaido Eastern Iburi earthquake

Yukihiro KOHATA

(Received 23th December 2019, Accepted 20th February 2020)

## Abstract

Natural disasters caused by huge earthquake have occurred in various places, and has made a great impact on social activities and people's lives in recent years in Japan. Then the effect on transportation caused by disaster on earthquake is very high. The Hokkaido Eastern Iburi earthquake in 2018 caused geotechnical disasters, which are large slope failures in wide area, and unique liquefaction at Satozuka area in Sapporo city etc. In particular, serious geotechnical damages were induced in Atsuma town recorded 7 on the Japanese seismic intensity scale (a magnitude of 6.7). The objective of this study is to investigate factors for geotechnical disaster due to 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake in these region. In this study, geomorphic and geological investigation for factor of slope failure occurred in the Atsuma town and that of liquefaction at Satozuka area in Sapporo city is discussed. In the survey, it is found that the large slope failure occurred in the Atsuma town is caused by Ta-d unit of Tarumae volcanic ash layer, and the type of slope failure is surface failure.

Keywords : Geotechnical disasters, Field survey, Slope failure, Liquefaction, Volcanic soil

## 1 はじめに

2018年9月6日3時7分に、北海道胆振地方中東部を震源とするマグニチュード6.7の直下型地震が発生し、北海道勇払郡厚真町では北海道の観測史上初となる最大震度7を記録し、平成30年北海道胆振東部地震と命名された。図1は震度分布図である<sup>(1)</sup>。安平町、むかわ町で震度6強、千歳市、日高町、平取町、札幌市東区で震度6弱であった。震源を中心にほぼ同心円状に震度が小さくなっているが、震源からの距離が約80km離れている札幌市東区の震度が大きい。震源の深さは37km、発震機構は東北

\*1 室蘭工業大学 もの創造系領域

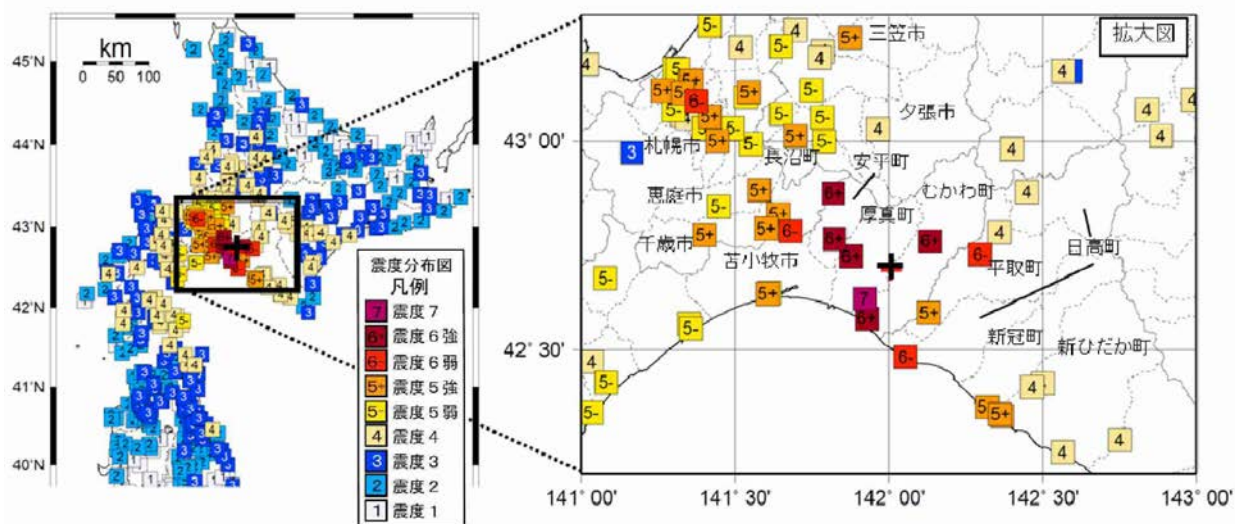


図1 震度分布図(1)

東—西南西方向に圧力軸を持つ逆断層型である。また、2019年2月21日21時22分にマグニチュード5.8となる余震が発生し、厚真町で最大震度6弱を記録した<sup>(2)</sup>。図2に震央分布図を示す<sup>(2)</sup>。当初、今回の地震は石狩低地東縁断層帯南部の断層が動いたことに起因するとの推論もあったが、図2より、本震、余震ともに石狩低地東縁断層帯に近い別の箇所での断層運動で発生したことが推察される。

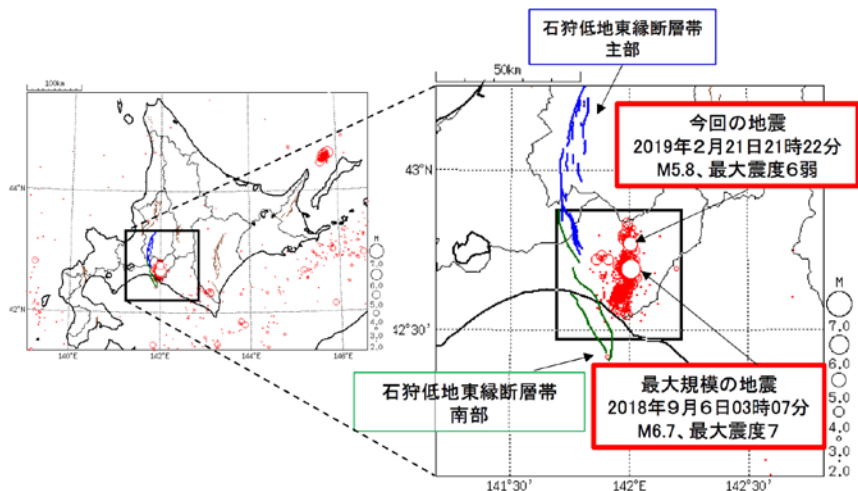


図2 震央分布図(2)

北海道胆振東部地震による災害の特徴は、広範囲にわたる大規模斜面崩壊や札幌市で観測された液状化被害であった。特に、札幌市清田区里塚で発生した液状化は、これまで見られた液状化現象とは異なり、地盤中に発生した液状化層が流動することにより、大規模な地盤沈下が生じるものであった。一方、わが国では初めてとなる事象として、電力会社が管轄するエリア全域で停電となるブラックアウトが発生し、北海道全域の経済活動が停止するばかりか、発災後の救助活動にも大きな影響を及ぼした。

本研究は、2018年9月北海道胆振東部地震の地盤災害に関して、厚真町吉野地区、富里地区、幌内地区および札幌市清田区里塚地区について現地調査を実施し、これらの調査から北海道胆振東部地震による地盤災害の発生要因について検討するとともに、その後の復旧状況と今後の課題について述べるものである。

## 2 被災概要と厚真町の斜面崩壊

### 2.1 北海道胆振東部地震の被災概要

平成31年4月1日現在で、人的被害は死者43名（震災関連死者数を含む）、重傷48名、軽傷734名であり、大規模な斜面崩壊が発生した厚真町は死者36名であり最も死者数が多かった<sup>(3)</sup>。重傷者は、むかわ町が24名で最も多く、次に苫小牧市の9名であった。軽傷者数は、最も多いのが札幌市で294名、



次いでむかわ町の250名であった。また、住宅被害は全壊469棟、半壊1,660棟、一部破損13,849棟、非住家被害（倉庫等）として2,490棟が報告されている<sup>(3)</sup>。全壊した住宅は、2016年熊本地震の全壊住宅8,682棟に比べると本地震による建物被害は少なかった。これは、北海道の住宅が冬期の雪荷重を考慮して瓦を使用していないこと、また、益城町に比べ世帯数が少なかったこと等が影響しているものと思われる。一方、北海道全域で電力供給が止まりブラックアウトとなり、最大停電戸数は約295万戸が報告されている<sup>(4)</sup>。これは1995年に発生した兵庫県南部地震による最大停電戸数の約260万戸を超える規模で、電力会社管内全域での停電は国内初であった。すべてが復旧するまでに要した時間は約45時間で、医療、通信、金融、交通等の社会インフラに深刻な影響を及ぼした。水道の被害は<sup>(4)</sup>、北海道内の44市町村において最大68,249戸の断水が発生した。意外なことに都市ガスの被害は報告されていない<sup>(4)</sup>。

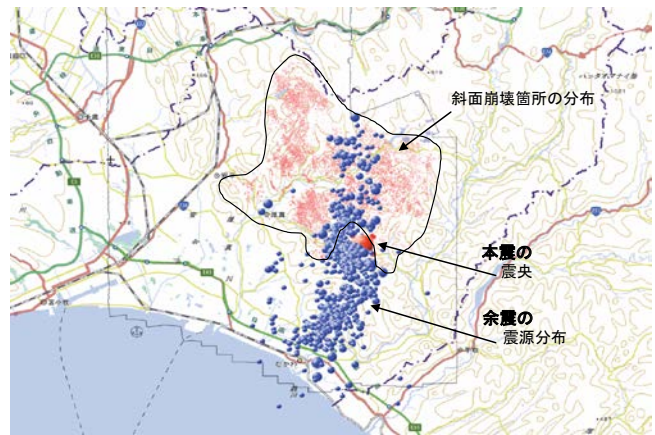


図3 斜面崩壊箇所との震源分布<sup>(5)</sup>

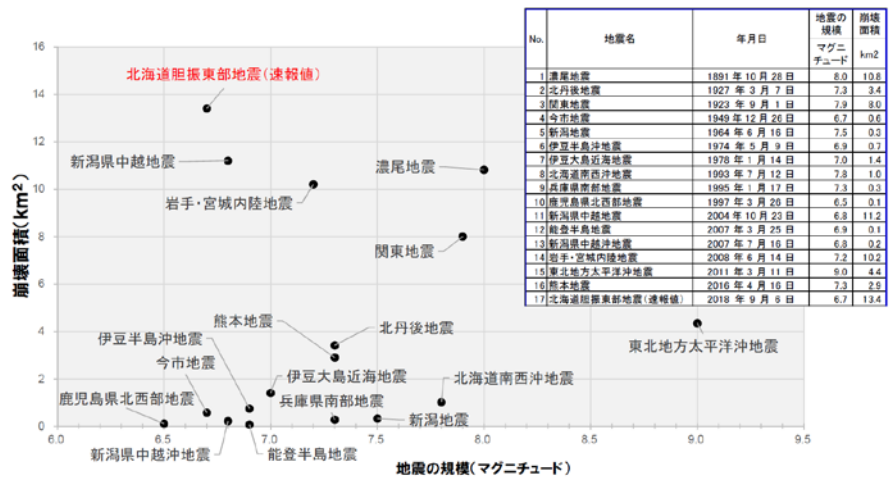


図4 過去の地震の規模と崩壊面積<sup>(6)</sup>

土砂災害については<sup>(4)</sup>、土石流が227件、うち厚真町で90件が発生、がけ崩れは133件うち厚真町で111件の発生が報告され、厚真町での土砂災害発生件数が極めて多かった。河川被害は<sup>(4)</sup>、270箇所であったが、堤防のクラック発生など、軽微なものが多かった。道路被害は<sup>(4)</sup>、発災後、14区間で通行止めとなったが、高速道路では、一部において路面の段差や亀裂等の損傷は発生したものの大きな被害はなく、9/9 8:00に全線で通行止め解除され、国道では目立った被害はなかった。JR北海道においては、発災後2日間運転見合わせとなったが、その後、順次運転が再開された。ただし、南千歳～沼ノ端間で軌道変位が多数発生し、約1週間程度、徐行運転が行われた<sup>(4)</sup>。

以上のように、明治以降の北海道における地震としては、初めて最大震度7を記録した直下型地震であり、甚大な被害が発生し社会的影響が極めて大きかったことが分かる。

## 2.2 厚真町の斜面崩壊

図3に本震の震央、余震の震源分布および厚真町の斜面崩壊箇所を示す<sup>(5)</sup>。余震の震源は震央を中心にほぼ南北方向に分布し、斜面崩壊箇所は広範囲に震央より北側に密集して発生している。図4に過去の地震の規模と崩壊面積の関係を示す<sup>(6)</sup>。今回の地震による斜面崩壊面積は13.4 km<sup>2</sup>、土量は3000万 m<sup>3</sup>であり、これは、札幌ドーム約440個分に相当する規模である。また、過去の地震の規模に対する崩壊面積が最も多いことが分かるが、これは明治以降の主要な地震災害の中でも最も多いことが報告されている<sup>(6)</sup>。厚真町の地質は、深度18 m付近まで表層から順に、樽前山、恵庭岳、支笏カルデラを噴出源とする火山灰で構成されており、樽前山起源の樽前降下軽石(Ta)地層は、Ta-aからTa-dまで4ユニットで構成されている。Ta-aは1739年、Ta-bは1667年、Ta-cは約2000年前、Ta-dは約9000年前の樽前山噴火によるものと考えられている。これらは粒径と風化の程度が異なり、層厚は1~4 m程度のものが



写真1 厚真町吉野地区の斜面崩壊



写真2 厚真町富里浄水場の斜面崩壊



写真3 土石流による厚真川の河道閉塞



図5 日高幌内川上流部大規模地すべり(9)

多く、N値は1~3程度と報告されている<sup>(7)</sup>。写真1は厚真町吉野地区における大規模斜面崩壊の状況であり、写真2は厚真町富里地区浄水場後背の斜面崩壊状況である。現地踏査およびUAV（ドローン）による上空からの俯瞰調査による現地調査を行った結果、厚真町吉野地区や富里地区の斜面崩壊は表層崩壊であることが分かった。また、吉野地区の崩壊箇所の斜面には筋状の擦過痕が見られることから、典型的な表層崩壊であり比較的速い速度で土塊が移動する斜面崩壊であったことが推察される。さらに、富里地区の斜面崩壊箇所では、表層崩壊と谷部での比較的深い位置からのすべり破壊が生じていたことも確認された。吉野地区、富里地区ともに、すべり面は樽前火山灰層のTa-dユニットであったと考えられる<sup>(8)</sup>。一方、幌内地区の斜面崩壊は比較的深い位置からのすべり破壊が見られ、すべり面の降下軽石堆積物（火山灰）は、恵庭岳を噴出源とするEn-aに近い性状を示したことから、恵庭軽石層まで、すべりの影響の可能性があると考えられる。写真3は、厚真川本川、幌内橋付近での斜面崩壊の状況である。写真中央の沢部から大量の土砂が流れ出し、河道閉塞が生じた状況であった。

一般に、土石流は豪雨により土砂や岩石が流水とともに高速で流下する現象であるが、今回の地震による土石流には水分があまり含まれていなかったようである。この土石流は、沢上部（深部）にあるいくつかの斜面が崩壊し、一体となって発生したものと考えられる。日高幌内川上流部の右岸において、図5に示すように、長さ約1000m、幅約500mにわたる尾根部が地震により約500m滑動し河川閉塞が生じた<sup>(9)</sup>。これは大規模かつ崩壊面が深い地すべりであると考えられる。

### 3 札幌市清田区里塚地区の地盤災害

札幌市清田区里塚において、地盤が「く」の字に折れ曲がるような極端な地盤沈下（陥没）が発生した。写真4は、地盤沈下（陥没）が顕著な箇所の発生状況である。地表面が局所的に沈下（陥没）していることが分かる。里塚地区は、3~4万年前の支笏カルデラ火砕流堆積物からなる台地の末端部に位置し、浸食により谷地形が形成され、1970年代に尾根を切土して谷埋め盛土することにより造成された宅地である。図6は宅地造成前の原地形に地盤変状が著しい箇所を示したものである。原地形の地盤は、





写真4 札幌市清田区里塚地区の地盤沈下状況

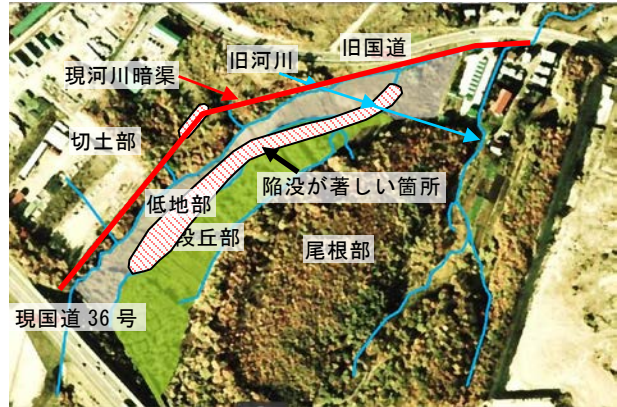


図6 地盤変状による被害箇所と原地形の比較(10)に加筆

図6に示す左下方から右上方に向かって傾斜しており、地盤変状箇所は旧河川（三里川、造成後は暗渠）の低地部に沿って発生している。宅地造成地の盛土材は火山灰質砂であり、また、地震発生前日の台風21号による日雨量35mmの豪雨があり地下水位が高かった可能性がある。里塚地区の地盤沈下（陥没）は、地震発生によって地盤内の盛土材が液状化し、宅地造成前の旧河川の沢沿いに上位箇所（図6左下方）から帯状に流動し、下位箇所（図6右上方）で地表面に流出して生じたものと考えられる<sup>(10)</sup>。なお、柱状図ではN値が0～1程度の地層があるが<sup>(10)</sup>、これは空洞ではなく自沈した状態にあったとのことである。

#### 4 地盤災害の復旧と今後の課題

写真5は、厚真川の仮復旧状況であり写真3の橋上から上流側（写真上方）を撮影した。仮復旧では河道確保が優先されたため、胆振・日高地区の重機の大半が集められ崩壊土砂の除去が急ピッチで進められた。本復旧については、地震発生から約1年経過し徐々に工事が進んでいる。特に、大規模な地滑りにより著しい河道閉塞が発生した日高幌内川の上流部では、国直轄事業として復旧対策が実施されている。図7は、2019年5月末の復旧状況である。図5とほぼ同じ位置で上流側から下流側を俯瞰している。復旧は、掘削工、水路工（約830m）、砂防堰堤（2基）を構築することにより、河道確保が行われている。また、厚真町吉野地区や富里地区の斜面崩壊箇所は、北海道により順次斜面安定対策工事が実施される計画である。

一方、札幌市清田区里塚地区の復旧工事は、市道直下を深層混合処理工法で、住宅の下の地盤を薬液注入工法で地盤改良する対策となっている。また、深層混合処理地盤内への地下水の流入を防ぐために、最上流側の市道と最下流側の公園の地盤を砕石置換により排水層とし、地下水上昇時に河川暗渠に排水させることとしている<sup>(11)</sup>。

本論で触れた地域以外にも札幌市東区や苫小牧東港等での液状化被害、安平町等の地すべり被害が生



写真5 厚真川の仮復旧状況



図7 日高幌内川上流部の復旧状況<sup>(6)</sup>



じており、直下型地震の破壊力を実感した。2019年9月現在、地震発生から1年経過したが、被災地の復旧は、復旧工事箇所全体の1割程度しか完了していない状況である。復旧工事が進捗しない要因として、崩壊斜面の所有者（管理者）が、国、北海道、個人等、多岐にわたるため、調整に多大な時間を要したことや農地の所有者が故人となり、農業後継者が不在で復旧対応に苦慮したことなどが挙げられる。これらの要因は今後の復旧対策の課題であろう。

## 5 まとめ

2018年9月北海道胆振東部地震の地盤災害に関して、厚真町吉野地区、富里地区、幌内地区および札幌市清田区里塚地区について現地調査を実施し、これらの調査から北海道胆振東部地震による地盤災害の発生要因について検討した結果、以下の知見が得られた。また、その後の復旧状況と北海道における地震災害に対する今後の課題をまとめると以下のようである。

- 1) 吉野地区の斜面崩壊については、樽前火山灰層（Ta-d）の表層崩壊であると考えられる。
- 2) 幌内地区の斜面崩壊については、大規模かつ崩壊面が深い斜面崩壊であると考えられる。
- 3) 幌内地区の降下軽石堆積物（火山灰）は、恵庭岳を噴出源とするEn-aに近い性状を示した。このことから、恵庭軽石層まで、すべりの影響の可能性があると考えられる。
- 4) 札幌市清田区里塚の液状化現象は、谷埋め盛土による造成宅地において、地盤中の沢埋め盛土が液状化したため、傾斜地である地盤面に沿って上流域で土が流動化し流出することにより、旧河川に沿って陥没が発生したと推察される。また、旧河川の下流域では、流動化して流れ出した土砂が、地盤を押し上げる圧力を増大させ、大量の泥土が噴出して舗装の剥離と著しい侵食を生じさせたと考えられる。
- 5) 復旧工事が進捗しない要因として、崩壊斜面の所有者（管理者）が、国、北海道、個人等、多岐にわたるため、調整に多大な時間を要したことや農地の所有者が故人となり、農業後継者が不在で復旧対応に苦慮したことなどが挙げられる。これらの要因は今後の復旧対策の課題である。

## 文献

- (1) 北海道開発局：【全体版】平成30年北海道胆振東部地震に係る復旧・復興等の状況（第4版）、<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/saigai/splaat000001e1uy-att/splaat000001fkqu.pdf>
- (2) 気象庁：平成31年2月21日21時22分頃の胆振地方中東部の地震について～「平成30年北海道胆振東部地震」について（第11報）、<https://www.jma.go.jp/jma/press/1902/21a/kaisetsu201902212320.pdf>
- (3) 総務省消防庁：平成30年北海道胆振東部地震による被害及び消防機関等の対応状況（第35報）（消防庁応急対策室：令和元年8月20日13:00）、<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/190820hokkaidoujisinn35.pdf>
- (4) 内閣府：平成30年北海道胆振東部地震に係る被害状況等について（平成31年1月28日15:00現在）、[http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin\\_hokkaido/pdf/310128\\_jishin\\_hokkaido.pdf](http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin_hokkaido/pdf/310128_jishin_hokkaido.pdf)
- (5) 国土地理院：平成30年北海道胆振東部地震に関する情報、斜面崩壊・堆積分布図、国土地理院地図、<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30-hokkaidoiburi-east-earthquake-index.html#10>
- (6) 国土交通省：平成30年北海道胆振東部地震の崩壊面積は明治以降の地震災害で最大（平成30年10月5日）、[http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h30\\_iburitobu/181005\\_sediment\\_volume.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/sabo/h30_iburitobu/181005_sediment_volume.pdf)
- (7) 北海道の火山灰質土の性質と利用に関する研究委員会：実務家のための火山灰質土～特徴と設計・施工、被災事例～、地盤工学会北海道支部、p.14、柱状図No.25、2010。
- (8) 産業技術総合研究所地質調査総合センター：平成30年北海道胆振東部地震の関連情報、現地調査報告その2「厚真町における表層崩壊」、2018、<https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/hokkaido2018/hokkaido2018-07.html>
- (9) 国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部：北海道胆振東部地震 復旧・復興、厚真川水系砂防事業所の工事、大規模河道閉塞対策、<https://www.hkd.mlit.go.jp/mr/kouhou/c5b1ee00000f4qa-att/c5b1ee00000f4sp.pdf>
- (10) 札幌市：清田区里塚地区における地震被害対策について、第2回説明会、配布資料、<http://www.city.sapporo.jp/kensetsu/stn/documents/dai2kaisetsumeikaisiryu2.pdf>
- (11) 札幌市：清田区里塚地区における地震被害対策について、工事説明会、配布資料、[https://www.city.sapporo.jp/kensetsu/stn/documents/kojisetumeikaisiryu\\_1.pdf](https://www.city.sapporo.jp/kensetsu/stn/documents/kojisetumeikaisiryu_1.pdf)

# 北海道胆振東部地震災害調査報告

後藤 芳彦\*<sup>1</sup>

(原稿受付日 令和元年 10 月 24 日 論文受理日 令和 2 年 2 月 20 日)

## Survey Report of the Iburi-Tobu Earthquake Disasters

Yoshihiko GOTO

(Received 24<sup>th</sup> October 2019, Accepted 20<sup>th</sup> February 2020)

### Abstract

In 2018, an earthquake occurred in the Iburi-Tobu district in Hokkaido, Japan, and caused severe disasters. This paper describes the results of field surveys of the Iburi-Tobu district. The results of field surveys provide invaluable information for mitigating future natural disasters in Hokkaido.

Keywords : Earthquake, Iburi-Tobu, Field Survey, Disaster

---

### 1 はじめに

北海道胆振東部地震では地震の震源域周辺において斜面崩壊が多数発生し、大規模災害を引き起こした。北海道胆振東部地域には支笏カルデラから噴出した脆弱な火山噴出物（降下火砕堆積物・火砕流堆積物等）が広く分布しており、これらの脆弱な火山噴出物が地震により崩壊した可能性が高い。しかし北海道における火山噴出物の脆弱性と斜面崩壊に関する防災学的な研究は、一部の分野を除いてこれまでほとんど行われていない。

我々は北海道胆振東部地震で発生した斜面崩壊の原因を探るため、北海道胆振地域を中心とした地質学的・地震学的な野外調査を行い、総合的な防災学的研究を行った。脆弱な火山噴出物の地質学特性や、その分布域を調査することは、北海道胆振東部地震で起きた大規模災害の原因を探る目的で重要である。本研究では北海道胆振東部地震で起きた大規模災害の原因を探り、さらに同様な地震災害が北海道内の他地域（例えば北海道胆振西部地域）で発生する可能性について調査・検討を進めた。このため、北海道胆振東部地域と類似した脆弱火山噴出物の野外地質調査を胆振地域全域に広げて行った。また、国内外で起きた地震斜面崩壊の過去の災害事例を調査した。

---

\*1 室蘭工業大学 もの創造系領域

## 2 調査方法

本研究では、(1) 北海道胆振東部の地質学的・地震学的調査、(2) 北海道胆振西部の地質学的・地震学的調査、(3) 国内外で過去に起きた同様な斜面災害例の3つの調査を行った。北海道胆振東部の地質学的・地震学的調査では、胆振東部の崩壊地およびその周辺地域において地質調査を行い、崩壊地の現状把握とテフラ層（降下火砕堆積物）に関する地質調査を行った。北海道胆振西部の地質学的・地震学的調査では、胆振西部（主に室蘭、伊達、洞爺、喜茂別、京極等の地域）を中心とした地質調査を行い、地質学的なテフラ層序調査を行った。国内外で過去に起きた同様な斜面災害例との比較では、国内外で過去に起きた地震と斜面災害の例に関する文献調査を行い、災害例のリストアップを行った。この3つの調査を総合し、北海道胆振東部で災害が起きた原因と、他の地域で将来同様な災害が起きる可能性について検討を行った。

## 3 調査結果

### 3.1 北海道胆振東部の地質学的・地震学的調査

北海道胆振東部地震で発生した斜面崩壊の原因を探るため、北海道胆振東部地域の地質学的・地震学的な野外調査を行った。特に、火山灰の分布、層序、地質学的特性を調査し、北海道胆振東部地域で起きた大規模災害の原因を総合的に明らかにした。その結果、北海道胆振東部地域では支笏カルデラから噴出した支笏火砕流堆積物の上位に恵庭火山や樽前火山から噴出したテフラが厚く覆っていることが確認できた。テフラ層は恵庭火山起源の En-a（約2万年前）、樽前火山起源の Ta-d（約9000年前）、樽前火山起源の Ta-c（約2500年前）、樽前火山起源の Ta-b（西暦1667年）、および樽前火山起源の Ta-a（西暦1739年）などからなる。特に、北海道胆振東部地震で斜面崩壊が発生した地域には、Ta-d、Ta-c、Ta-b、Ta-a が堆積しており、これらの固結度の低いテフラ層が地震振動により崩壊したことが明らかになった。

### 3.2 北海道胆振西部の地質学的・地震学的調査

北海道胆振東部地震で発生した斜面崩壊災害が、将来北海道の他地域で起きる可能性について議論するために、北海道胆振西部地域の脆弱火山噴出物に関する地質調査を行った。その結果、北海道胆振西部を中心とした地域（伊達から洞爺にかけての地域）において、洞爺カルデラから噴出した洞爺火砕流堆積物の上位に、クッタラ火山、中島火山、有珠火山などから噴出したテフラ層が厚く覆っていることが確認できた（Goto et al., 2018）。また洞爺火砕流堆積物は非溶結であり、溶結した支笏火砕流堆積物と異なる物理的性質を有することが確認できた（Goto et al., 2019）。伊達・洞爺よりさらに北方の喜茂別から京極にかけての地域では、尻別火山から噴出した喜茂別火砕流堆積物の上位に、羊蹄火山から噴出したテフラ層が厚く覆っていることが確認できた。羊蹄火山から噴出したテフラ層は、未固結で多くの軽石層を伴っている。以上のように、北海道胆振東部地域と同様に、北海道胆振西部地域に固結度の低いテフラ層が広く分布することが確認できた。これらのテフラ層が地震による振動により崩壊する可能性について、今後詳細な調査を行う必要がある。

### 3.3 国内外で過去に起きた斜面災害調査

国内外で過去に起きた地震斜面崩壊災害に関する災害例の文献調査を行い、これらの災害例と北海道胆振東部地震の災害を比較・検討した。その結果、地震による脆弱火山噴出物の大規模斜面崩壊災害は、国内外で頻繁に発生していることが判明した。例えばイタリアのイスキア1883年地震では、エポメオ火砕流堆積物が地震により崩落し、カサミチョーラ市街地を壊滅させる大災害を発生させた。ニュージーランドでは1991年にクック山の山頂部が大崩落したが、この例では氷河が関連したと考えられている。

国内では、2016年の熊本地震において阿蘇カルデラ内で大規模な崩壊が発生しており、これは阿蘇カルデラを形成した脆弱な火砕流堆積物等が崩壊して発生したと考えられている。北海道胆振東部地震災害は、国内外で過去に起きた同様な斜面災害例との比較して、表層のテフラ層が崩壊したという点で、過去の災害事例と異なっている。北海道には極めて固結度の低いテフラ層が多く分布することから、この点は留意すべきであろう。

## 4 北海道における自然災害の軽減

### 4.1 北海道における自然災害

北海道は地震や活火山が多く自然災害が頻繁に起こる地域である。このため北海道における自然災害の軽減は急務の課題である。北海道胆振東部地震で発生した斜面崩壊は、固結度の低いテフラ層が、地震による振動により崩壊して発生した可能性が高い。北海道胆振東部地震で発生した斜面崩壊は稀なタイプの自然災害である。北海道には固結度の低いテフラ層が広く分布していることから、このようなタイプの自然災害を防止することは重要である。脆弱な火山噴出物の地質学特性やその詳細な分布域を調査することは、北海道胆振東部地震で起きた大規模災害の原因を探るのみならず、将来北海道で起こりうる自然災害の軽減に役立つ。特に北海道南西部では、脆弱な火山噴出物が広く分布することが確認された。これらの火山噴出物の詳細な調査・研究を進め、社会に広く発信するべきである。

### 4.2 脆弱な火山噴出物の斜面崩壊に関する研究推進

脆弱な火山噴出物の斜面崩壊災害は、1996年の北海道豊浜トンネル崩落事故でも発生した。豊浜トンネルでは、新第三紀のハイアロクラスタイトと呼ばれる火山噴出物が崩壊し、大きな災害を引き起こした。このような災害を防ぐため、北海道では1996年以来、新第三紀のハイアロクラスタイトの分布範囲調査とその災害防止研究が10年以上かけて行われてきた。また、豊浜トンネルの事例では、岩盤の凍結融解が岩盤崩落の主な原因とされ、そのような凍結融解による岩盤崩壊を想定した研究が進められてきた。しかしこの想定に反し、北海道胆振東部地震災害では新しい第四紀火山噴出物（脆弱なテフラ層）が地震により崩壊した。このような第四紀火山噴出物に関する地震防災学的研究はこれまでほとんど行われていない。北海道胆振東部地震で発生した斜面崩壊により、脆弱なテフラ層の斜面崩壊が発生することが判明した。今後は第四紀テフラ層の斜面崩壊に関する詳細な調査・研究を進めるべきである。

### 4.3 地震災害と火山災害のリンク

地震災害と火山災害の防災研究は、本来リンクさせて研究するべきであるが、専門性の違いや研究手法の違いのため、これまでは別々に研究が行われてきたことが多かった。今回の北海道胆振東部地震災害により、地震災害と火山災害の防災研究をリンクさせ、防災研究を進める重要性が高まった。本研究による国内外で過去に起きた地震斜面崩壊災害に関する災害例の文献調査により、北海道胆振東部地震災害に似たような、地震と火山噴出物がリンクした災害が過去にも発生していることが判明した。北海道胆振東部地震災害と同様な災害事例を収集し、今後の防災に役立てることは、活火山の多い北海道において急務の課題である。

### 4.4 大学と自治体の防災協定

北海道胆振東部地震で発生したような斜面崩壊の予測を行うためには、様々な研究分野を横断した防災研究が必要である。このような研究を進めるため、大学と自治体による地域防災協定を推進し、斜面崩壊の総合的な研究を推進することが重要であろう。地域防災協定により、大学が行う防災研究を社会に還元することができ、今後の防災に大きく役立つと考えられる。



## 謝辞

本報告書を作成するにあたり、平成30年度室蘭工業大学北海道胆振東部地震災害緊急調査支援補助事業経費を使用した。ここに謝意を表す。

## 文献

- (1) Goto Y., Suzuki K., Shinya T., Yamauchi A., Miyoshi M., Danhara T., and Tomiya A. (2018) Stratigraphy and lithofacies of the Toya Ignimbrite in southwestern Hokkaido, Japan: Insights into the caldera-forming eruption at Toya caldera. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)* 127:191–227.
- (2) Goto Y., Danhara T. and Tomiya A. (2019): Catastrophic sector collapse at Usu volcano, Hokkaido, Japan: failure of a young edifice built on soft substratum. *Bulletin of Volcanology*, 81, 37.

# 平成 30 年北海道胆振東部地震で発生した斜面崩壊の特徴と 地盤工学的考察

川村 志麻\*<sup>1</sup>, 岸田 航平\*<sup>2</sup>

(原稿受付日 令和元年 10 月 31 日 論文受理日 令和 2 年 2 月 20 日)

## Slope failures over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake and its evaluation

Shima KAWAMURA and Kohei KISHIDA

(Received 31<sup>th</sup> October 2019, Accepted 20<sup>th</sup> February 2020)

### Abstract

The 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake caused a large amount of slope failures over a wide area. In particular, the enormous damage due to slope failures was centered in Atsuma and Abira town which are to the north of the epicenter. In Atsuma town, a seismic intensity of seven has been observed for the first time in Hokkaido, Japan. The geology in this region was mainly formed from three kinds of pyroclastic fall deposits (fa) erupted from Tarumae volcano, Eniwa volcano, and Shikotsu Caldera. Especially, the serious damage was generated in these tephra stratus. This report summarizes earthquake-induced damages on natural slopes, and presents physical feature and mechanical properties of the collapsed pyroclastic fall deposits distributed over this area.

Keywords: The 2018 Hokkaido Iburi Eastern Earthquake, slope failure, pyroclastic fall deposits

---

### 1 地盤工学会, 土木学会災害調査団による現地災害調査報告について

2018 年 9 月 6 日 3 時 7 分頃、北海道厚真町を震源とする M6.7 の地震が発生し、北海道勇払郡厚真町では震度 7 を観測した。気象庁はこの地震を「平成 30 年北海道胆振東部地震」と命名している。厚真町周辺では、広範な土砂崩壊が同時多発的に発生し、樽前山、恵庭岳、支笏カルデラを噴出源とする「降下軽

---

\*1 もの創造系領域 社会基盤ユニット

\*2 北見市 (室蘭工業大学 卒業生)

石火砕堆積物」によって形成された自然斜面がこの大惨事誘発の主要因になった（写真 1 参照）。（公社）地盤工学会と土木学会では災害調査団を立ち上げ、現地の被害状況を調査・報告<sup>1)~4)</sup>している。ここでは、それを援用し、併せて筆者らの現地視察で得られた知見<sup>5),6)</sup>に基づいて、斜面災害の概要と日高幌内川の河道閉塞地点周辺の表層すべり崩壊した斜面より採取した降下火砕堆積物の物理・力学特性を報告する。

## 2. 厚真町周辺の地質特性と被災状況

### 2.1 厚真町周辺の地質特性

現地調査地点の概略図を図 1 に示す。震源地となった北海道胆振東部地域では、樽前山および恵庭岳と支笏カルデラを噴出源とする火山灰質土が広く分布している。支笏カルデラの降下テフラは約 4 万年前、恵庭岳の降下テフラは約 2 万年前、樽前山の降下テフラは約 300~9000 年前に堆積したとされている<sup>7)</sup>。

図 2 は、国土地理院の胆振東部地震による斜面崩壊・堆積分布図<sup>8)</sup>に、主に今回の災害の素因となった樽前山および恵庭岳を噴出源とする降下火砕堆積物の降灰範囲と震源からの距離を加筆して示したものである。樽前山を噴出源とする降下火砕堆積物（Ta）は、樽前山より東の方角に降灰の基軸を持ち、Ta-a から Ta-d までの 4 ユニットに分かれている。恵庭岳を噴出源とする降下火砕堆積物（En-a）も同様に東方に基軸を持ち、その降灰範囲は樽前系のものに比べ広い。それらは、いずれも粗粒な軽石により構成されており、乾燥密度は低く、その軽石部には内空空隙が含まれていることが特徴である<sup>9)</sup>。また、図より、斜面災害が発生した地域は、両火山灰質土が分布する地域と重なっていることが明らかである。判読の結果、その降灰の厚さはおおそ 50cm~100cm であった。

### 2.2 調査地点の被災概要

調査地点である日高幌内川流域では、沢地形が連続しており、斜面崩壊が発生しやすい地形であった。また、日高幌内川は谷地形を縫うように流れており、地震によって発生した大規模な岩盤すべりが谷を塞ぎ、河道を閉塞した。写真 2 は、大規模な岩盤すべりが発生した斜面の上空からドローンで撮影したものである。幅が約 400m、比高 50m の尾根が約 500m にわたって移動し、川を約 1100m の長さに亘り、せき止めたと報告されている<sup>10)</sup>。

写真 3 は、現地調査時点（H30.10.4 時点）での河道閉塞により形成されたダム湖の状況を示したものである。調査時点では 1 日あたりおよそ 50cm/日<sup>10)</sup>の速さで水位が上昇していた。日高幌内川の大規模な岩盤すべり下部周辺では、泥岩の岩体が散乱していた。岩塊の直径は約 15~25cm ほどで、手やハンマーで砕くことができるほどに崩れやすいものもあった。なお、日高幌内川をせき止めた岩盤すべりは、泥岩層内部にできたすべり面（中新統軽舞層の泥岩シルト岩互層の層理面）において崩壊したと見られ



写真 1 平成 30 年北海道胆振東部地震の厚真町大規模斜面崩壊の様子（北海道大学 清水教授提供）

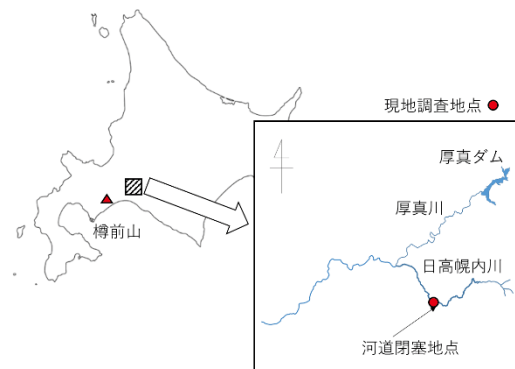


図 1 日高幌内川の位置と現地調査地点

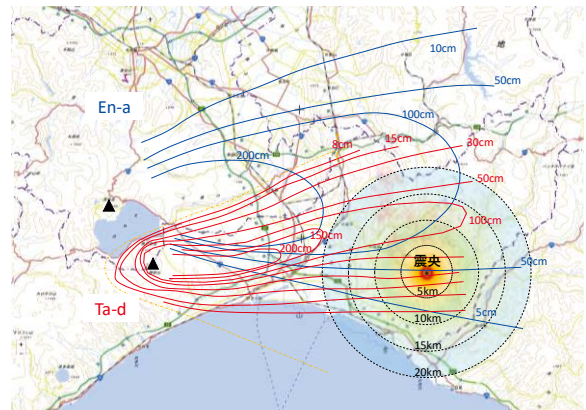


図 2 地理院地図：平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う斜面崩壊・堆積分布図（北海道厚真町周辺）（国土地理院 HP より引用・加筆）

ている。このすべり崩壊の原因として、この箇所は他の地域に比べて震源にも近いこと（5~10km 圏内）から、地震による強振動が影響したものと推測される。

一方、この岩盤すべり崩壊箇所の周辺では、表層すべり崩壊も多数確認されている。写真 4 は、岩盤すべり周辺で発生した表層すべり崩壊地点の様子を示したものである。写真からも明らかなように、この地点では、地表から 3m 程度の土層がすべり、その土塊が流下していた。この斜面は 25~30° の勾配を持ち、すべり面基部の泥岩には湿潤状態の火山灰質土が薄く堆積していた。増井ら<sup>11)</sup>は、この地域の近辺では、粘土鉱物のハロイサイトが生成されていると報告している。

表層すべり崩壊した土塊は、主に、厚真町吉野地区、富里地区の被災現場にて確認された Ta-d と考えられる赤褐色（赤橙色）で粗粒な土粒子から構成されていた。なお、この地域より北側では、恵庭岳と支笏カルデラを噴出源とする降下火砕堆積物である En-a、Spfa-1 がすべりの素因となっている箇所もある。例えば、石丸ら<sup>12)</sup>は厚真町周辺の斜面崩壊の状況を説明しており、厚真町幌内地区では岩盤すべり、同朝日地区では Ta-d 層底面すべりと、En-a まじり斜面堆積物表層のすべり、同幌里地区では、沢型緩斜面の土層すべりで高速流動変形が発生したことを報告している。

### 3. 被災箇所から採取した土質の地盤工学的特徴

ここでは、日高幌内川の河道閉塞地点（岩盤すべり発生地点）周辺部の表層すべり崩壊発生地点で採取した火山灰質土の物理力学特性について報告する<sup>1)~6)</sup>。

採取箇所は前述の表層すべり崩壊箇所である（写真 5）。試料は、土層を①~⑥に分類し、各層から採取している。図 4 と表 1 は、各試料の粒径加積曲線、示標特性を示したものである。なお、試料①は表層付近に位置するクロボクである。この層は、細粒化が進行しており、粒径加積曲線にもその特徴が現れている。試料②~⑥の試料に関しては、おおよそ相似な曲線を示し、ほぼ同等な粒度特性を示していることがわかる。

次に、土粒子の密度と自然含水比について調査を行った。試料②の土粒子の密度は $\rho_s=2.78\text{g/cm}^3$ 、試料③~⑥は $\rho_s=2.49\sim 2.50\text{g/cm}^3$ を示した。自然含水比 $w_n$ の比較では、試料②が $w_n=34.4\%$ と低い値を示すものの、それ以外は $w_n=138.5\sim 197.3\%$ を示している。なお、採取日の 2 日前に 22.5mm/h の降雨が観測されている。強熱減量の試験結果では、北海道内の粗粒火山灰質土が示す値<sup>9)</sup>（おおよそ 10%以下）と同等の値（ $Li=4.99\sim 7.10\%$ ）を示していることがわかる。また、ほぼ同じ物性を持つ③~⑥の比較では、それらに違いが現れている。特に、すべり境界にあたる試料⑥の値が高いようである。一般に、自然含水



写真 2 日高幌内川大規模岩盤すべり崩壊の状況（ドローンからの空中写真）（苫小牧工業高等専門学校 谷口助教提供）



写真 3 砂防堰堤付近の天然ダム湖の状況



写真 4 表層すべり崩壊地点の露頭の様子



比が大きくなるほど、強熱減量が大きくなることが知られているが、試料⑥は、露頭の最下部層に位置しているため、地下水位等の水の影響を受けた可能性も考えられる。試料⑥に関しては、層の一部が変質し、ハロイサイトのような粘土分が生成<sup>11)</sup>されている可能性があり、同じ Ta 堆積層およびそれと同等の物性を持つ土層においても化学的な風化の進行が伺える。

次に、三軸試験による力学挙動を調べてみた。露頭部の代表的なユニット Ta-d (赤褐色) 層④を用いている。実施した試験は、圧密排水三軸試験 (CD) と圧密非排水三軸圧縮試験 (CUB 試験) である。各供試体 (直径 70mm, 高さ 170mm) は多重ふるい落下法 (MSP 法) により作製しており、圧密後の相対密度  $D_{rc}$  は 104~118% になった。なお、シンウォールサンプリングによる原位置の乾燥密度は  $0.440 \text{ g/cm}^3$  であった。最大・最小乾燥密度は、三軸試験に用いた試料粒径を用いて算定し、それぞれ  $\rho_{dmax} = 0.472 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{dmin} = 0.269 \text{ g/cm}^3$  である。試験は、有効拘束圧  $\sigma'_c = 49 \text{ kPa}$ ,  $98 \text{ kPa}$ ,  $196 \text{ kPa}$  で圧密後、間隙圧係数  $B$  値が 0.96 以上になったことを確認し、せん断速度  $0.25\%/min.$  の下で試験を行っている。なお、各供試体の飽和化には二酸化炭素法が用いられている。



写真5 表層すべり崩壊現場の露頭部の状況

図5は、圧密非排水 (CUB) と圧密排水 (CD) 試験から得られた最大、最小主応力比 ( $=\sigma_1'/\sigma_3'$ ) と最大、最小主ひずみ ( $=\varepsilon_1, \varepsilon_3$ ) の関係を示したものである。比較のため、森火山灰質土と富川火山灰質土と中標津火山灰質土の試験結果を併記している。森火山灰質土は駒ヶ岳を、富川火山灰質土は支笏カルデラを、中標津火山灰質土は摩周を噴出源とした北海道を代表的する火山灰質土である。特に、摩周を噴出源とする中標津火山灰質土は、茶褐色で粗粒な土粒子を持つ火山灰質土であり、その粒子の脆弱性は、今回の試料と非常によく似ている。なお、これらの火山灰質土の力学特性については既報に詳しい<sup>13)</sup>。

はじめに、CUB の試験結果について示す。図より、強度-変形特性は密な砂が示す硬化-軟化型の挙動と類似していることがわかる。また、各試料の相互の正確な比較はできないものの、樽前火山灰質土 (Ta-d) の主応力比は富川火山灰質土や中標津火山灰質土の値よりも低く、森火山灰質土より高い値を示している。有効拘束圧  $\sigma'_c$  の増加に伴って同じひずみレベルでの応力比が低下しており、拘束圧依存性を示している。一方、CD 試験結果では、樽前火山灰質土の主応力比は森火山灰質土や富川火山灰質土の値よりも低く、中標津火山灰質土のそれに類似の傾向を示していることがわかる。このような排水条件の違いによる力学挙動の変化は、破壊時の平均主応力の違いに起因する粒子破砕量に起因して生じたものであろう<sup>6)</sup>。結果として、せん断強度パラメータは、それぞれ  $c' = 8 \text{ kPa}$  と

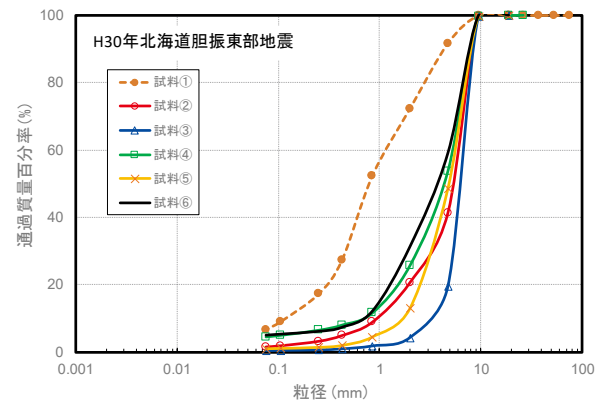


図4 表層すべり崩壊地点より採取した試料の粒径加積曲線

表1 各試料の示標特性

	①	②	③	④	⑤	⑥
自然含水比(%)	71.1	34.4	142.2	197.3	160.7	138.5
土粒子の密度( $\text{g/cm}^3$ )	2.81	2.78	2.5	2.49	2.49	2.49
強熱減量(%)	-	-	4.99	5.88	4.85	7.10
10% 粒径(mm)	0.1	0.9	2.8	0.6	1.4	0.6
平均粒径(mm)	0.8	5.1	6.1	4.1	3.9	3.4
均等係数	11	6.7	2.5	8.5	3.9	8.0
液性限界(%)	-	-	-	93.9	-	-
塑性限界(%)	-	-	-	N.P.	-	-
最大密度( $\text{g/cm}^3$ )	-	-	-	0.472	-	-
最小密度( $\text{g/cm}^3$ )	-	-	-	0.269	-	-

$\phi' = 42.5 \text{ deg.}$ 、 $c_d = 33.0 \text{ kPa}$  と  $\phi' = 29.0 \text{ deg.}$  になった。

前述のように、三軸試験では飽和状態の力学強度パラメータを調査した。続いて、①乾燥状態と②不飽和状態における樽前火山灰質土の力学挙動を調べてみた。行った試験は、定圧一面せん断試験である。試験は地盤工学会基準<sup>14)</sup>を準用し、実施している。地盤工学会基準では、最大粒径 0.85 mm 以下の土質への適用が規定されているが、樽前降下火砕堆積物は最大粒径 0.85 mm 以上の土試料が含まれているため、試験結果への影響が含まれている可能性もあるが、ここでは参考値として議論を進める。

乾燥状態の供試体(直径 60mm、高さ 20mm)は、空気乾燥した土試料を空中落下させることによって作製している。その後、所定の応力 49kPa、98kPa、147kPa で圧密し、ひずみ速度 1.0mm/min. の下、せん断変位  $\delta$  が 8.0mm になるまで試験を行った。不飽和状態の供試体は、乾燥状態の試料と同様に空中落下法で作製後、せん断箱ごと 24 時間水浸させ、その後 1 時間重力脱水させた。なお、飽和度  $S_r$  は計測した含水比から算出し、 $S_r = 71.6\% \sim 99.3\%$  の範囲にある。圧密圧力は 49kPa、98kPa、147kPa の 3 種類、ひずみ速度は 0.2mm/min. として、せん断変位  $\delta$  が 8.0mm となるまで試験を行った。

図 6 に空気乾燥状態におけるせん断応力-せん断変位の関係を示す。図より、圧密応力が 49kPa、98kPa、147kPa に増加するに従って、せん断応力が増加していることがわかる。ダイレイタンスー特性に着目すると、有効拘束圧が 49kPa、98kPa、147kPa のいずれにおいても負のダイレイタンスー領域で破壊している(図 7)。得られた結果から、モールの応力円を用いた粘着力  $c_d$  とせん断抵抗角  $\phi_d$  はそれぞれ、 $c_d = 22.4 \text{ kPa}$ 、 $\phi_d = 47.1 \text{ deg.}$  となった。

図 8 は、不飽和状態でのせん断応力-せん断変位の関係を示したものである。図より、圧密応力が増加するにしたがって、せん断応力が増加していることがわかる。一方、空気乾燥状態の試験結果と比べて、98kPa、147kPa のせん断応力のピーク値が小さくなっていることも確認できる。ダイレイタンスー特

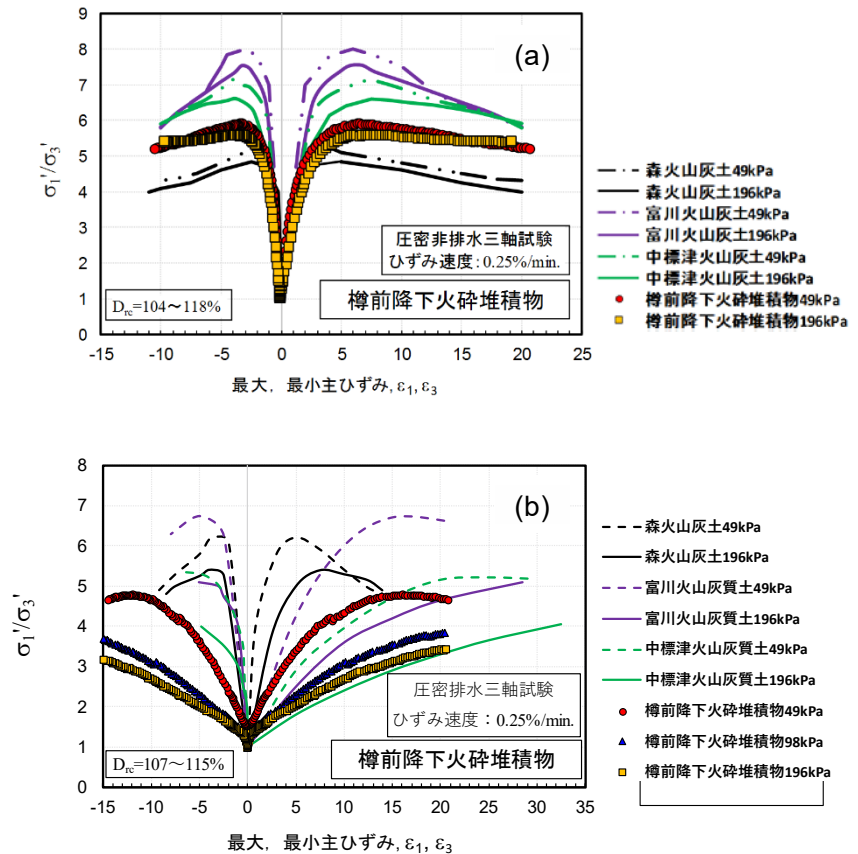


図 5 静的三軸試験から得られた最大、最小主応力比 ( $=\sigma_1'/\sigma_3'$ )と最大、最小主ひずみ( $=\epsilon_1, \epsilon_3$ )の関係：  
(a)CUB 試験、(b)CD 試験

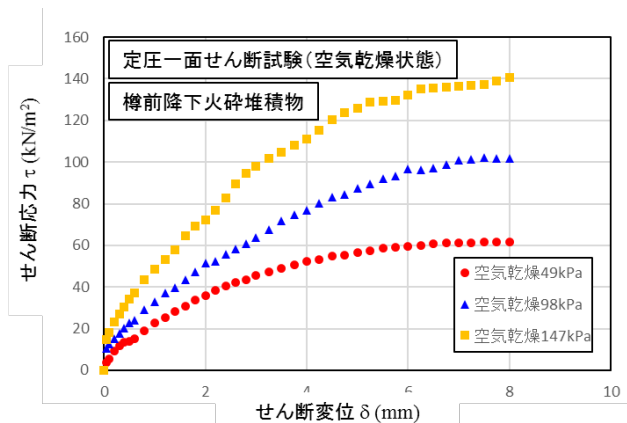


図 6 樽前火山灰質土のせん断応力-せん断変位の関係 (空気乾燥状態)

性に着目すると、先程と同様、いずれも負のダイレイタンシー領域で破壊している(図9)。それぞれの結果から、 $c_d=22.4\text{kPa}$ ,  $\phi_d=51.2\text{deg.}$ となった。

上記の結果について、空気乾燥状態と不飽和状態における挙動の違いについて考察を行う。表-2は実験で得られた強度パラメータを示したものである。樽前降下火砕堆積物は、液性限界試験・塑性限界試験の結果、N.P.と判定されていることから、ここでは、各圧密圧力に対する割線係数によりせん断抵抗角 $\phi_d$ を算出し、工学的評価を行った。参考のため、飽和状態の三軸試験結果も併せて示す。

乾燥状態と不飽和状態における同一圧密応力下の比較では、乾燥状態の $\phi_d$ が圧密応力の増加に伴って不飽和状態のものより大きくなっていることがわかる。試験方法(応力場)が異なるので正確な比較はできないが、飽和状態の三軸試験結果との比較からも乾燥状態の強度が最も高い。特に、不飽和状態の圧密応力147kPaでは、強度が大幅に低下していることがわかる(表-2参照)。このことは、空気乾燥状態と比較しても特徴的である。前述のように、本試験料は地盤工学会基準ではN.P.と判断されるものの、液性限界は計測されることから、水分と細粒分(粒子破碎)の影響によって摩擦の低減効果が生じ、せん断抵抗角が低下した可能性が高い。いずれにしても、詳細な検討が必要である。

#### 4. まとめ

一連の現地調査、物理・力学試験を行った結果、以下のような結論を得た。

1) 日高幌内川上流部では、吉野地区や富里地区の表層崩壊<sup>1)~5)</sup>と異なり、大規模な岩盤崩壊が発生していた。移動体主部のすべり面は、中新統軽舞層の泥岩シルト互層の層理面(流れ盤)とみられている。また、その周辺で発生した表層崩壊は、樽前起源の降下火砕堆積物がすべり崩壊していた。表層すべりは基盤となる泥岩とTa-dとの境界で発生していた。また、Ta-d層と工学的に同一と判断した土層においても風化の進行が伺えた。

2) 樽前降下火砕堆積物 Ta-d のせん断強度特性を調査したところ、その強度パラメータは、排水、非排水

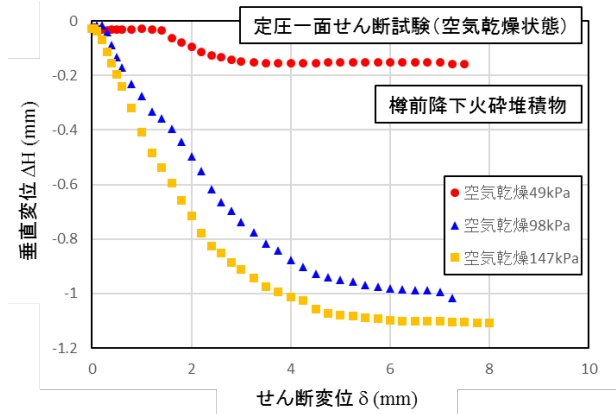


図7 樽前火山灰質土のダイレイタンシー特性(空気乾燥状態)

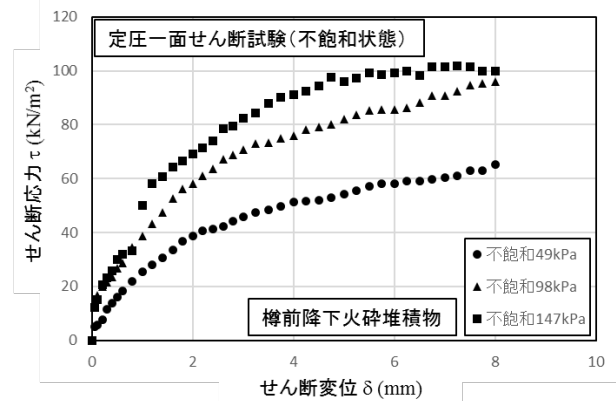


図8 樽前火山灰質土のせん断応力-せん断変位の関係(不飽和状態)

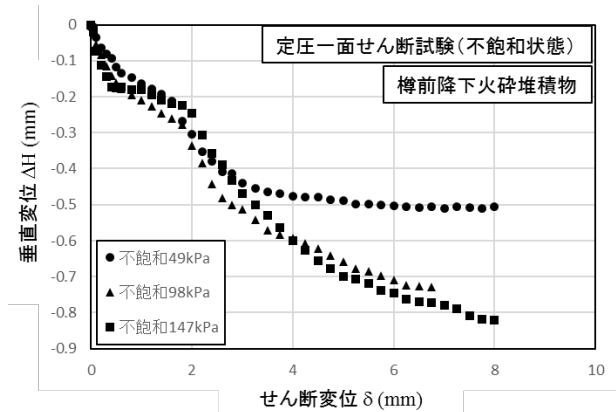


図9 樽前火山灰質土のダイレイタンシー特性(不飽和状態)

表2 定圧一面せん断試験の試験結果

	空気乾燥状態( $S_r=0\%$ )			不飽和状態( $0<S_r<100\%$ )			飽和状態( $S_r=100\%$ )		
試験方法	定圧一面せん断試験			定圧一面せん断試験			圧密排水三軸試験		
圧密応力	49kPa	98kPa	147kPa	49kPa	98kPa	147kPa	49kPa	98kPa	196kPa
$\phi_d(\text{deg.})$	51.5	46.1	43.7	53.1	44.4	34.7	40.8	34.0	35.3

条件ならびに飽和、不飽和条件によってかなり変化する。地盤や斜面の安定性など、工学的な評価を行う上では、適切な判断が必要となる。

### 謝辞

本研究を実施するにあたり、北海道開発局室蘭開発建設部、北海道から、土試料ならびに、各種災害情報の提供を頂いた。また、現地調査では本学 中津川誠教授と苫小牧工業高等専門学校 谷口陽子助教の協力を得た。なお、本研究は、JSPS 科研費 JP17H03318 ならびに平成 30 年度室蘭工業大学北海道胆振東部地震災害緊急調査支援補助事業の助成で行われた。記して、深甚なる感謝の意を表します。

### 文献

- (1) 平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団最終報告書，地盤工学会，2019.9.
- (2) 2018 年北海道胆振東部地震・大阪北部地震被害調査報告書，-地震被害調査シリーズ No.2, No.3-, 土木学会，2019.9.
- (3) 地盤工学会北海道支部：平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団速報会，2018.10.2，(<http://jgs-hokkaido.org/>)
- (4) 土木学会北海道支部：2018 年 9 月北海道胆振東部地震災害緊急合同調査団報告会，2018.12.15，2019.1.27 (<https://www.jsce.or.jp/branch/hokkaido/>)
- (5) S. Kawamura, S. Kawajiri, W. Hirose and T. Watanabe: Slope failures/landslides over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, *Soils and Foundations*, 2019. (掲載決定)
- (6) 岸田航平，川村志麻：樽前山を噴出源とする降下火砕堆積物の力学特性とその評価，地盤工学会北海道支部年次技術報告集，第 59 号，pp.161-168，2019.1.
- (7) 古川竜太，中川光弘：樽前火山地質図，2010.
- (8) 国土地理院：平成 30 年北海道胆振東部地震に関する情報，(<http://www.gsi.go.jp/>)
- (9) 地盤工学会北海道支部 北海道の火山灰質土の性質と利用に関する研究委員会：実務家のための火山灰質土～特徴と設計・施工，被災事例～，2010.12.
- (10) 北海道開発局：平成 30 年北海道胆振東部地震に伴う災害対応状況，(<https://www.hkd.mlit.go.jp/>)
- (11) 増井淳一，庄子貞雄：火山灰土壌中のカオリン鉱物について（第 2 報）ハロイサイトの産状，*日本土壤肥科学雑誌*，Vol.40, No.12, 1969.
- (12) 石丸聡：胆振東部地震により厚真周辺で発生した斜面崩壊，*日本地すべり学会北海道支部・日本応用地質学会北海道支部合同調査報告*：2018.9.29.
- (13) 三浦清一，八木一善，川村志麻：北海道火山性粗粒土の静的および動的力学挙動と粒子破砕，*土木学会論文集*，No.547/III-36, pp.159-170, 1996.9.
- (14) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説（二分冊の 1），pp.287-308，2010.

# 北海道胆振東部地震における胆振・日高地方の 建物の被害調査結果

高瀬 裕也\*<sup>1</sup>, 永井 宏\*<sup>1</sup>, 溝口 光男\*<sup>2</sup>

(原稿受付日 令和元年 12 月 2 日 論文受理日 令和 2 年 2 月 20 日)

## Field Survey Results of Building damage in Iburi and Hidaka Regions by 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake

Yuya TAKASE, Hiroshi NAGAI and Mitsuo MIZOGUCHI

(Received 2<sup>nd</sup> December 2019, Accepted 20<sup>th</sup> February 2020)

### Abstract

On September 6, 2018, Hokkaido Eastern Iburi Earthquake was occurred. The center of this earthquake is Atsuma of Iburi region. Moreover, the maximum seismic intensity was 7. After this earthquake, the authors investigated RC buildings and foundation damages in Iburi and Hidaka regions. As the result of the survey, however very sever damages were not confirmed, there were minor damages at RC non-structural walls, RC expansion joints and foundations on banking. Therefore, a structural design methods are required for these members.

Keywords : Building Damage, Crack, Foundation, Ground, Lateral flow

---

### 1 はじめに

日本は世界有数の地震大国であり、我が国の建築構造物は、これまでも何度となく強い地震動を受け、その度に大規模な被害を経験してきた。このような被害を克服すべく建築基準法が繰り返し改正され、耐震性の高い設計法が確立されている。しかしながら、2011年の東北地方太平洋沖地震や、2016年の熊本地震においては、古い規準で建設された建物（いわゆる、旧耐震建物）の被害や、天井や非構造壁、さらには基礎構造物の被害などが報告<sup>例えば(1),(2)</sup>されている。

---

\*1 室蘭工業大学 もの創造系領域

\*2 室蘭工業大学 理事（学術担当）・副学長



周知のように平成30年9月6日未明、厚真町を震源とする最大震度7の北海道胆振東部地震（以下、本地震と呼ぶ）が発生した。本地震による被害の特徴としては、斜面災害や液状化による被害、さらにはブラックアウトなどが多く報じられているが、建築物の耐震設計の発展のためには、揺れによる構造物の建物被害を把握することも重要であると考えられる。

そこで著者らは、震源近傍で震度6強から震度7の極めて大きな揺れが観測された、厚真町、むかわ町、安平町の3つの地域を対象に、本地震の直後から建物の被害調査を数回に分けて実施した。本報告では、これらの現地調査の結果について述べる。また建物の被害状況としては、木造建物の被害や、斜面災害による建物の被害も見られたが、まずは著者らの専門領域に主眼を置き、鉄筋コンクリート構造物（以下、RC構造物と略記する）の被害（高瀬が主担当）と、基礎構造物の被害（永井が主担当）を重点的に調査することとした。したがって本報告において、RC構造物の被害については第2章で、基礎構造物の被害については第3章で、それぞれ概要を述べることとする。

## 2 RC構造物の被害状況

### 2.1 調査方法

本調査では、厚真町、むかわ町、安平町の3つの地域の建物の被害調査を実施した。前述したように、主にRC構造物を対象に調査を行うが、被災地域の特質上、大規模なRC構造物が少ないことから、学校建築物や集合住宅を中心に調査を行った。また本調査結果の一部や、本報告では触れていない被害事例について、既に公開しているものもある<sup>(3)</sup>。

調査方法は主に目視による外観調査とし、一部の許可が得られた建物（表2.5の学校B1およびB2）で内観調査を実施した。調査時期は、地震発生から約1週間経った9月中旬から12月上旬であり、6回に分け実施した。表2.1に各調査の目的や、調査ルートなどの概要を示す。また調査項目は、外壁の剥落の確認、ひび割れの有無およびクラックスケールによるひび割れ幅とした。なお本調査の結果報告について、現在も実際に使用されている建物がほとんどであることから、基本的には建物の固有名称を伏せて記述することとする。

さらにRC建物の被害の検証方法としては、文献(4)による損傷度を指標とする。表2.2に同文献より、部材の限界状態と損傷度および損傷の状態の関係を示す。表2.2より、残留ひび割れ幅が0.2mm程度以下であれば損傷度Iとなり、そのまま継続使用が可能である。また、残留ひび割れ幅が0.2~1.0mm程度の範囲であれば損傷度IIとなり、容易な補修により建物の使用が可能になる。

表 2.1 調査概要

—	調査人数	調査目的	調査地域
1回目	7名	被害状況の全容確認	新ひだか町⇒むかわ町⇒厚真町⇒安平町
2回目 <sup>※1</sup>	8名	被害状況の全容確認	むかわ町⇒厚真町⇒安平町
3回目 <sup>※2</sup>	5名	学校B1の内観調査	安平町
4回目 <sup>※2</sup>	12名	学校B2の内観調査	安平町
5回目	4名	建物の外観調査	むかわ町⇒厚真町
6回目	2名	建物の外観調査	安平町

※1 基礎構造物の調査チームと合同で実施

※2 北海道大学の調査チームと合同で実施

表 2.2 部材の限界状態と損傷度および損傷の状態の関係<sup>(4)</sup>

限界状態	部材の状態	損傷度	具体的な損傷の状態		
			鉄筋	コンクリート	残留ひび割れ幅
使用限界 ⇒	継続使用可能	I	弾性	ほぼ弾性	0.2mm 程度以下
	容易に修復可能	II	わずかに降伏する程度	健全	0.2～1.0mm 程度 (0.2～0.5mm)*
修復限界 I ⇒	修復可能	III	座屈しない	コアコンクリートは健全	1～2mm 程度 (0.5～1.0mm)*
修復限界 II ⇒		IV	破断しない	コアコンクリートの圧壊は生じない	
安全限界 ⇒	地震応答時および地震終了時鉛直荷重による応力を安定して維持				
	耐力低下	V	破断	コアコンクリートの圧壊	

\*：耐震壁および柱・梁接合部の残留せん断ひび割れ幅の目安

## 2.2 RC 建物被害調査の結果

### 2.2.1 学校建築物

本調査では、全 21 校の学校建築物（厚真町 5 校，安平町 7 校，むかわ町 9 校）の目視調査を行った。ここで、表 2.3 に北海道教育委員会の市町村別公立小・中学校の耐震化率の推移<sup>(5)</sup>から、調査地域の結果の欄を抜粋する。表 2.3 より、地震が発生する前の平成 30 年 4 月 1 日の時点で、調査地域の耐震化率が全て 100%であることから、調査地域の全ての学校において、耐震診断の結果、耐震性に問題がなかったか、あるいは耐震改修が実施されているものと判断される。

以下、地域毎に被害事例の概要を記述することとする。

表 2.3 調査対象地域の公立小・中学校の耐震化率の推移<sup>(5)</sup>

管内	市町村名	耐震化率		
		H29.4.1 時点	H30.4.1 時点	H31.4.1 時点
胆振	安平町	100%	100%	100%
	厚真町	100%	100%	100%
	むかわ町	100%	100%	100%

#### (1) 厚真町

表 2.4 に厚真町における学校建築物の被害状況の一例を示す。厚真町は震源地域でもあり、観測された最大震度は震度 7 と、当該地域の建物は、極めて大きな地震動を受けたと推察される。

表 2.4 より多くの学校建築物で被害が確認されるが、ひび割れ幅が大きいものでも 0.5mm 程度であり、表 2.2 の損傷度区分では損傷度 I から II の範囲になっていると考えられる。

写真 2.1 に学校 A1 の被害状況を示す。同写真を見ると、梁や開口部周囲の外壁にひび割れが散見される。しかしながら、ひび割れの一部で錆びのような形跡が確認されるものもあり、本地震が発生する前に既に生じていたひび割れもあるものと推量される。

表 2.4 厚真町における学校建築物の被害状況の一例

記号	地域	最大震度	校舎の諸元	被害状況の概要
A1	厚真町	震度 7	3 階建 RC 構造	梁に斜めひび割れ, 柱に曲げひび割れ, 基礎にひび割れ( $w=0.4\text{mm}$ 程度), 開口部にひび割れ
A2			3 階建 RC 構造	古いひび割れ多数, 吹き付けタイル・外壁が損傷
A3			2 階建 RC 構造	吹き付けタイル剥落, 基礎にひび割れ

$w$  : ひび割れ幅



(a) 梁および柱のひび割れ



(b) 開口部周囲のひび割れ

写真 2.1 学校 A1 の被害状況

(2) 安平町

表 2.5 に安平町における学校建築物の被害状況の一例を示す。安平町の学校建築物においても, 被害は散見されるものの, 損傷度区分としては厚真町と同様に, 損傷度 I から II の範囲であると考えられる。

表 2.5 安平町における学校建築物の被害状況の一例

記号	地域	最大震度	校舎の諸元	被害状況の概要
B1	安平町	震度 6 強	3 階建 RC 構造	ひび割れ多数, 非構造壁損傷, 地震後使用中止になったが補修して三学期から再開
B2			3 階建 RC 構造	柱曲げひび割れ, スラブ段差, EXP.J.損傷, 非構造壁損傷, 再建 <sup>(6)</sup>
B3			2 階建 RC 構造	体育館にひび割れ( $w=0.4\text{mm}$ 程度), 腰壁にひび割れ, 柱に曲げひび割れ, 仕上げ損傷
B4			3 階建 RC 構造	柱に曲げひび割れ, 腰壁にひび割れ, 体育館の屋根損傷, 壁に斜めひび割れ
B5			2 階建 RC 構造	道路の割れ, 体育館危険判定 (天井落下, 内壁の損傷など)

$w$  : ひび割れ幅

写真 2.2 に学校 B1 の被害状況を示す。本建物では、外観調査だけでなく内観調査も実施している。(a)に示すように、当該建物は外付けブレースなどにより耐震補強されている。当該建物においては、(b)に示すエキスパンションジョイント（以下、EXP. J. と略記する）およびその周囲のタイルやの損傷や、(c)および(d)に示すように非構造壁の損傷が確認された。さらに地震前は、時計付きの飾り壁が屋根部分に取り付けられていたが、(e)に示すように本地震によって大きく損傷したため、現在は撤去されている。



(a) 建物全景



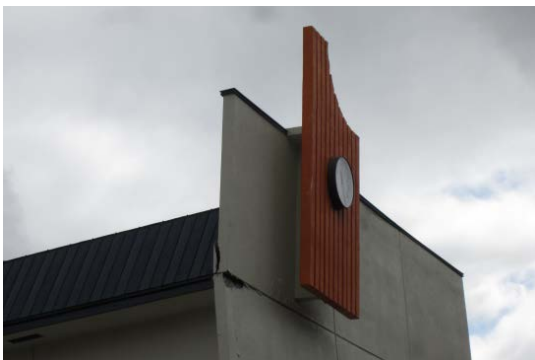
(b) EXP. J.の損傷



(c) 非構造壁の損傷-1



(d) 非構造壁の損傷-2



(e) 時計付き飾り壁の損傷



(f) 飾り壁の撤去後(H30.11 撮影)

写真 2.2 学校 B1 の被害状況

写真 2.3 に学校 B2 の被害状況を示す。本建物においても、外観調査だけでなく内観調査も実施している。(a)に示すように当該建物では、床に大きなひび割れが確認された。また、(b)や(c)に示す通り、学校 B1 と同様に非構造壁や EXP. J. の被害も確認された。さらに、基礎梁の仕上げモルタルの剥落などの損傷も確認された。この他にも、建物内部において RC 梁の仕上げモルタルの剥落が生じていた。



(a) 床に生じたひび割れ



(b) 非構造壁の被害



(c) EXP. J. の損傷



(d) 基礎梁の仕上げモルタルの剥落

写真 2.3 学校 B2 の被害状況

(3) むかわ町

表 2.6 にむかわ町における学校建築物の被害状況の一例を示す。厚真町と安平町の学校建築物と同様に、損傷度 III を超えるような被害は、目視による外観調査の範囲では確認されなかった。

表 2.6 むかわ町における学校建築物の被害状況の一例

記号	地域	最大震度	校舎の諸元	被害状況の概要
C1	むかわ町	震度 6 強	2 階建 RC 構造	柱に曲げひび割れ( $w=0.25\text{mm}$ 程度)
C2			2 階建 RC 構造	壁・開口部にひび割れ( $w=0.25\text{mm}$ 程度), EXP.J. 15cm くらいのずれ
C3			2 階建 RC 構造	エントランスの壁に斜めひび割れ, 外壁 が剥落, 道路損傷, 体育館の壁にひび割れ ( $w=0.35\text{mm}$ 程度)
C4			2 階建 RC 構造	腰壁にひび割れ( $w=0.5\text{mm}$ 程度), 基礎にひ び割れ

$w$  : ひび割れ幅



写真 2.4 から写真 2.6 に、むかわ町で確認された学校建築物の被害事例を示す。

写真 2.4 は学校 C2 において、校舎と体育館の渡り廊下の EXP. J. に生じた被害であり、このためか基礎梁で、仕上げモルタルの剥落が確認される。また写真 2.5 は、学校 C4 の腰壁に生じたひび割れを示している。さらに学校 C3 では、写真 2.6 に示すように外壁の剥落が確認された。



写真 2.4 校舎と体育館の渡り廊下の EXP. J. の被害(C2)



写真 2.5 腰壁に生じたひび割れ(C3)



写真 2.6 外壁の剥落(C4)

### 2.2.2 その他の建物

前項では、学校建築物の被害事例について報告した。前述のように本対象地域では、地域の特質上大規模な RC 構造物はほとんどないが、庁舎や集合住宅など、幾つかの RC 造建物があり、これらの建物においても、被害が確認された。そこで本項では、これらの被害事例について述べる。

写真 2.7 から写真 2.9 に、当該対象地域で確認された RC 造建物の被害事例の一部を示す。

写真 2.7 は外壁の被害事例である。この建物は、複数の倉庫が立ち並ぶ敷地の一角にあるものであり、躯体が RC 構造、外壁がレンガで構成されているが、同写真に示す通り、レンガの外壁がくずれ落ちている。同じ区域にあるこの他の倉庫においても、ブレースが座屈していたり、基礎にひび割れが生じたりするなどの被害が散見された。

写真 2.8 は、厚真町にある 3 階建の集合住宅の被害事例である。学校建築物においても、校舎と校舎の間、あるいは校舎と渡り廊下との間の EXP. J. で被害が確認された。これらと同様に写真 2.8 も EXP. J. の被害である。この集合住宅は、2 つの棟が平面的に「へ」の字形に並んでおり、これらをつなぐ渡り

廊下との間の EXP. J. 周囲で被害が生じている。これまでに見た被害と異なり, RC 柱のかぶりコンクリートが, 鉄筋が見えるほど大きく剥落している点に特徴がある。

写真 2.9 は, むかわ町にある 4 階建の集合住宅の被害事例であり, 基礎梁から壁に向かって大きなひび割れの発生が確認された。



写真 2.7 外壁の被害事例 (厚真町)



(a) 建物全景 (渡り廊下)



(b) EXP. J. の被害

写真 2.8 3 階建て RC 集合住宅の EXP. J. の被害 (厚真町)



(a) 建物全景



(b) 基礎梁から壁に伸びるひび割れ

写真 2.9 4 階建て RC 集合住宅の被害 (むかわ町)

### 3. 基礎・地盤関連の被害状況

#### 3.1 まえがき

本章では、主に地盤変状とそれに起因する建築物の基礎を対象として実施した地震被害調査について報告する。調査地域は震央に近い胆振・日高地方の厚真町、安平町、むかわ町および新ひだか町である。

調査は9月13日に上記4つの市町に赴き、初動調査として被害状況を把握した。また、12月25日と12月26日に追加調査として厚真町豊沢地区の分譲地における戸建て住宅の被害調査を実施した。本調査結果の一部は文献(7)において報告している。

#### 3.2 被害状況と被害要因

##### 3.2.1 厚真町

厚真町は最大震度7を観測した地域であり、新町と豊沢の2つの地区の調査を実施した(図3.1)。

##### (1) 新町地区

厚真町新町地区は、中心市街地から南東方向に位置し、標高が市街地よりも10~20m程高く、傾斜地が多い。この地区では、写真3.1~写真3.2に示すように、道路や建物敷地内に地盤変動に伴う地割れの被害が多数発生していた。

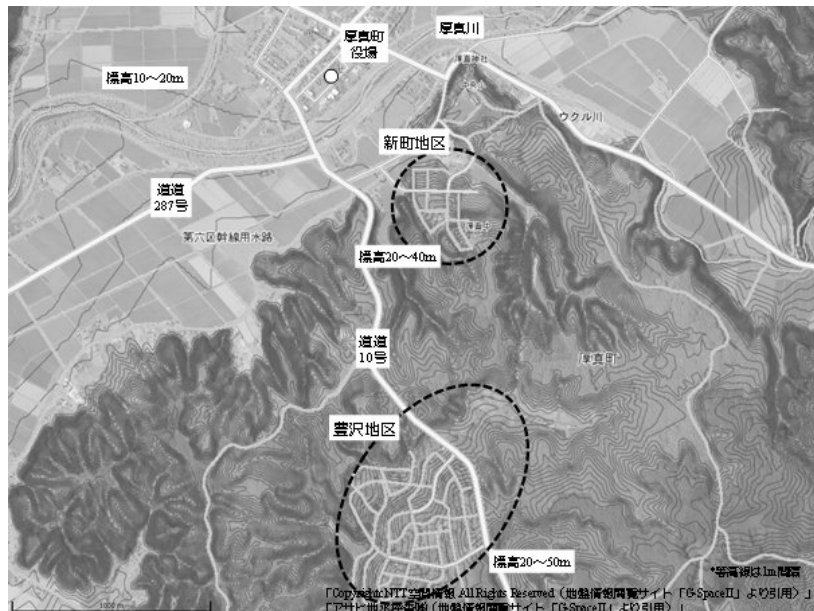


図3.1 厚真町の調査エリア(航空写真・標高コンター)



写真3.1 整備中の道路に生じていた地割れ



写真3.2 建物敷地内に生じていた地割れ





写真 3.3 擁壁の沈下・水平移動



写真 3.4 建物の背面地盤での地割れ

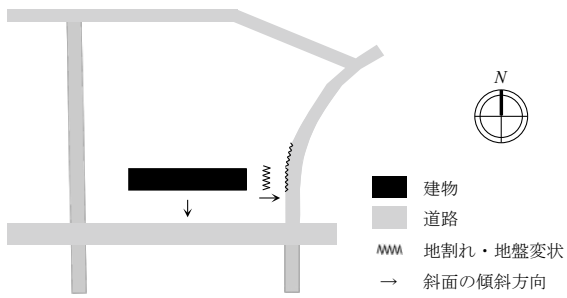


図 3.2 RC 造 3.F 建物の配置図



写真 3.5 RC 造 3.F 建物の全景



写真 3.6 1F 出入口の損傷



写真 3.7 敷地東側での地割れ



写真 3.8 基礎隅角部の損壊



写真 3.9 基礎に一部ひび割れ



写真 3.3 に示す 2 階建ての戸建て住宅では、建物自体の沈下や傾斜は外観上からはほぼ確認できなかったが、建物前面の擁壁が 3.0cm 程度沈下および水平方向へ動いた形跡が見られた。建物の前面道路の先には斜面があり、また建物の背面地盤で地割れ（写真 3.4）が見られたことから、地盤が斜面方向へ大きく動いたことで被害が生じたと思われる。

写真 3.5 は RC 造 3 階建てアパートの全景である。この建物は、図 3.2 のように南・東側の周辺道路よりも数 m 高い場所に建てられており、1 階出入口で基礎部材の損傷（写真 3.6）が確認された。また、建物の敷地東側で地割れ（写真 3.7）が生じると共に、東側アプローチの斜路では 20cm 程度の段差が発生、道路との境界となる歩道では隆起が生じていた。建物周辺の地盤変状によって軽微な被害は確認されたものの、建物自体の沈下や傾斜は認められなかった。

その他に、傾斜地において住宅の基礎部材の損傷（写真 3.8、写真 3.9）や擁壁のはらみ出し、ブロック塀の倒壊などの被害が確認された。

## (2) 豊沢地区

厚真町豊沢地区は中心市街地から南方向に位置し、そのうちの一つは 1980 年代に分譲が開始された地区である。この地区は、天然の樹木や自然の地形を残した場所であるため、起伏に富んだ地形で傾斜地が多い。そのため、地盤のすべりや地震時の地盤変動が隣地と差が大きくなったことが要因と思われる被害が見受けられた。

写真 3.10 は玄関側のデッキ部分が損壊した平屋の住宅である（写真はデッキ部分が撤去後）。この敷地は住宅の南側と東側（写真の手前側と右側）が傾斜しており、東側には沢が流れている。地盤が斜面方向に変動したことが要因で住宅に大きな被害を及ぼしたと思われる。

写真 3.11 は傾斜地に建つ平屋の住宅であり、谷側にある柱が中央の梁との接合部で折損する被害が確認された。被害が生じた柱の脚部が谷側へ水平移動していることから、斜面のすべりに伴う地盤変位の影響が建物の位置によって差異が生じたことで断面欠損した柱の弱部に被害が生じたと思われる。



写真 3.10 地盤の変動によって損壊したと思われる住宅（正面のデッキ部分の撤去後）



写真 3.11 地盤のすべりによって谷側の柱が折損したと思われる住宅

### 3.2.2 安平町

安平町は最大震度 6 強を観測した地域であり、調査を実施した早来大町地区は JR 安平駅から北東に位置する。

この地区の比較的平坦な敷地に、RC 造 2 階建ての集合住宅が図 3.3 のように全体で 3 棟配置されていた。写真 3.12 に示す建物 A では、西側の地盤で建物の長辺方向（北西－南東方向）に沿って最大幅 40cm 程度の地割れが見られた。また、建物の南側では地盤が 3.0cm 程度沈下し、地下埋設物が地上に突出していた（写真 3.13）。基礎部材においては、建物西面の出隅部で水平方向のひび割れ、南面では鉛直方向のひび割れが多数生じていた。基礎部には軽微な被害が確認されたが、建物自体の沈下や傾斜は認めら

れなかった。建物 B でも周辺地盤が 10cm 程度沈下し、建物北側の共用部分の床・壁の境界部では水平方向に大きなクラックが発生（写真 3.14）していた。また、建物 B と建物 C の住棟間の通路において多数の変状が見られ、周辺道路でも 5cm ほどの段差が生じていた。

写真 3.15 は丘陵地に建つ神社における被害の状況である。社殿が完全に崩壊し、屋根が地上にある状態であった。参道にある石柱が東側へ転倒し、また神社の南側に位置する住宅地の斜面ですべり（写真 3.16）が見られたことから、地盤変動が大きかったと思われる。

写真 3.17 は神社の西側の傾斜地に建つ 2 階建ての戸建て住宅の被害状況であり、外壁が損壊して一部が剥落していた。敷地は建物の南西側と北西側に斜面があり、北西側の擁壁がはらみ出していた。地盤変動によって基礎が大きく動き、変形が上部構造物にも及んだと思われる。

その他に、写真 3.18 に示すように住宅の基礎部材に一部ひび割れや損傷などが見られたが、比較的新しい住宅では外観上からは大きな被害は確認できなかった。

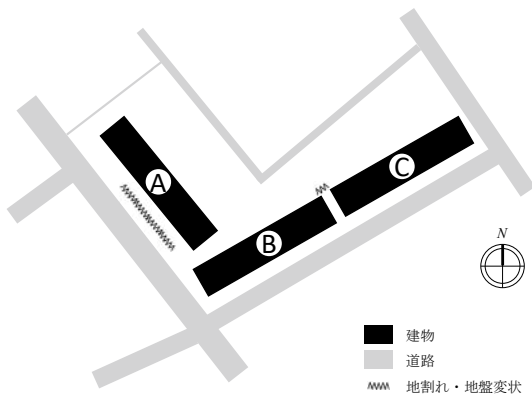


図 4.3 RC 造 2F 建物の配置図



写真 3.12 RC 造 2F 建物 A の全景と地割れ



写真 3.13 地盤沈下と基礎に一部ひび割れ



写真 3.14 建物 B の共用部分での損傷



写真 3.15 社殿の崩壊（手前側）



写真 3.16 神社の南側斜面のすべり





写真 3.17 傾斜地に建つ住宅と擁壁の被害



写真 3.18 基礎に一部ひび割れ

### 3.2.3 むかわ町

むかわ町は最大震度 6 強を観測した地域であり、調査を実施した美幸、末広、大原地区はむかわ駅の南側～東側に位置する市街地である。地盤の水平変位に伴うインターロッキングの変状が至る所で発生していた。

むかわ駅の南側の道道 10 号線沿いで写真 3.19 に示すように、比較的古い店舗併用住宅の 1 階部分が倒壊していたケースが多く見られ、倒壊を免れた建物でも大きく変形するなど被害が大きかった。そのため、それらの建物の基礎・地盤の状況を確認することが困難であった。一方、比較的新しい住宅では、無被害または基礎の一部にひび割れ（写真 3.20）や損傷が生じる軽微な被害であった。その他に、擁壁の損傷などが確認された。



(1) 建築物 A



(2) 建築物 B

写真 3.19 建築物の倒壊・変形（基礎・地盤の被害状況の確認が困難）



写真 3.20 基礎に一部ひび割れ

### 3.2.4 新ひだか町

新ひだか町は最大震度 6 弱を観測した地域であり，調査地は静内の山手・末広地区である。

盛土した部分での地盤変状が顕著であり，RC 造 5F アパートでは地盤沈下に伴う埋設管の隆起や基礎フーチング（またはパイルキャップ）周辺の地盤の沈下が確認された（写真 3.21～写真 3.23）。また，戸建て住宅の基礎梁の損傷（写真 3.24）なども見られた。



写真 3.21 地盤沈下に伴う埋設管の隆起



写真 3.23 基礎フーチング周辺の地盤変状



写真 3.22 地盤変動に伴う外階段の変状



写真 3.24 基礎梁の損傷



## 4 まとめ

著者らは、北海道胆振東部地震において、震央の周辺地域を対象に、建物の被害状況を把握するための現地調査を実施した。以下に、本調査結果による知見を述べる。

### 4.1 RC 建築物

第2章において、北海道胆振東部地震における、厚真町、むかわ町、安平町の鉄筋コンクリート造建物の被害調査の結果について述べた。学校建築物では、一部の学校が建て替え、取り壊しになったものの、目視調査の結果では最大でも損傷度Ⅱであり、軽微な損傷であったと言えよう。

また、非構造壁やエキスパンションジョイントおよびその周囲の構造部材に、ひび割れやコンクリートの剥落等の被害が散見された。これらの部材については、明確な耐震設計法は確立されておらず、今後、何らかの対策や、設計法の提案が必要であるように思われる。

### 4.2 基礎構造物

震央に近い地域では、道路や建物敷地内での地盤の隆起や陥没の被害が非常に多かった。そのため基礎部材の損傷も多数見られ、平坦地に盛土をして建設された建物では基礎周辺の地割れや沈下が大きかった。更に、傾斜地では地盤の側方移動に起因すると思われる建物の被害だけでなく、異種基礎と思われる建物の被害も見られた。異種基礎や基礎の根入れに対する効果など地盤と基礎に関する被害を低減させる対策や設計法は今後の検討課題である。

## 謝辞

本調査では、室蘭工業大学および東京工業大学の多くの学生に協力を頂きました。また一部の写真は、北海道大学・白井先生、越川先生よりご提供いただきました。ここに深い謝意を表します。

## 文献

- (1) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会, 東日本大震災合同調査報告, 建築編1 鉄筋コンクリート造建築物, 日本建築学会, 2015
- (2) 高瀬裕也, 池田隆明, 鈴木武志, 妹尾嘉章, 阿部隆英, 久保田雅春, 増幅機構付制震装置で耐震補強された10階建高層住宅建築物の補強効果の考察, 日本建築学会技術報告集, 第18巻, 第39号, 2012.6, pp.535-540
- (3) 日本建築学会北海道支部被害調査SWG (RC造), 北海道胆振東部地震の建物被害に関する初動調査報告 (RC造), [http://saigai.aij.or.jp/saigai\\_info/20180906\\_hokkaido/20181001\\_iburi\\_EQ\\_RC\\_hokkaidoB.pdf](http://saigai.aij.or.jp/saigai_info/20180906_hokkaido/20181001_iburi_EQ_RC_hokkaidoB.pdf) (2019.11.3 閲覧)
- (4) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針 (案)・同解説, 2004
- (5) 北海道教育委員会, 市町村別公立小・中学校の耐震化率の推移, <http://www.dokyoi.pref.hokkaido.lg.jp/hk/gst/kouritugakkousisetunotaisinnkaisyuujoyoukyoutyousakekka5-2.pdf> (2019.11.3 閲覧)
- (6) 安平町, 早来中学校の再建について, <https://www.town.abira.lg.jp/oshirase/66/10471> (2019.12.2 閲覧)
- (7) 飯場正紀, 永井宏, 北海道胆振東部地震の被害調査報告書 (速報) 基礎地盤関連, 北海道胆振東部地震初期の被害調査に基づく報告会, [http://saigai.aij.or.jp/saigai\\_info/20180906\\_hokkaido/20181001\\_iburi\\_EQ\\_Soil\\_hokkaidoB.pdf](http://saigai.aij.or.jp/saigai_info/20180906_hokkaido/20181001_iburi_EQ_Soil_hokkaidoB.pdf), 2018.9 (2018.12.26 閲覧)

# 北海道胆振東部地震における災害廃棄物発生原単位推定

吉田 英樹\*<sup>1</sup>

(原稿受付日 令和元年 11 月 5 日 論文受理日 令和 2 年 2 月 20 日)

## Survey of disaster waste treatment and disposal in Hokkaido

Hideki YOSHIDA

(Received 5<sup>th</sup> November 2019, Accepted 20<sup>th</sup> February 2020)

### Abstract

Big earthquake occurred at East Iburi area on September 2016 and many houses were devastated. Such disasters left a huge amount of wastes in those areas. The disaster wastes in a small town was surveyed for those quantity and quality in order to evaluate a safe and environmental sound management of those wastes. The disaster waste generation based on the architecture elements was estimated to be about 72 tons per house. A hundred houses were demolished so far and the average disaster waste were monitored to be about 87 tons per house by the suffered municipality. Those debris includes concrete (weight rate, 65%), wood (weight rate, 10%), etc. The total amount of disaster waste generated in Atsuma, Abira and Mukawa communities is estimated to 77,000 tons.

Keywords : Disaster waste, Debris, Demolition, Generation

---

## 1 はじめに

北海道内では災害廃棄物の発生に関する調査事例がほとんどない状況である。これまで平成 28 年台風 10 号による豪雨被害の大きかった道内自治体での水害に伴う災害廃棄物の調査を行ってきた<sup>1)</sup>。平成 30 年胆振東部地震より被災した自治体では大量の災害廃棄物の発生が見られた。そこで、被災した道内のある自治体において、被災家屋の解体に伴う災害廃棄物の原単位推定及び災害廃棄物発生状況を、担当者へのヒアリングを通して実態を把握し、北海道における災害廃棄物の原単位推定について検討した。そして、胆振 3 町（厚真、安平、むかわ）の被災データに基づいて、災害廃棄物発生量及び質を予測した。

---

\*1 室蘭工業大学 もの創造系領域

## 2 災害廃棄物の現地調査結果について

### 2.1 現地調査について

災害廃棄物の調査を行った北海道内自治体（以下、被災自治体）において、平成30年9月27日に現地の視察を行い、被災自治体の仮置場の管理状況の視察を実施した。

### 2.2 発災直後の現地での災害廃棄物の管理状況

平成30年9月27日（発災後3週目）に被災自治体での現地調査を行い、町内での複数の災害廃棄物仮置場の状況を確認した。図1に示すように、災害廃棄物が品目ごとに仮置きされ、集積されている状況だった。水害に比べて、比較的良好な状態で廃棄物が積み上げられ、一部はフレキシブルコンテナバッグに詰められて仮置きされているものもあった。仮置場では分別担当者が廃棄物を搬入する車両に指示を出して、品目ごとに排出するように指導していた。特に廃家電の量が極めて多く、ブラウン管テレビが排出されているテレビ類の半数を占める状況であり、被災とは関連のない廃棄物の排出も見られた。このような災害廃棄物仮置場は当初複数設けられていたが、平成31年3月までには1つに集約して、主に被災家屋の解体に伴って発生する災害廃棄物の処理に移行していたと思われる。

### 2.3 発災から1年後の現地での災害廃棄物の管理状況

令和元年7月4日（発災後10ヶ月目）に被災家屋の解体に伴って発生する災害廃棄物の仮置場の現地調査を行った。図2のように災害廃棄物が置かれた仮置場の状況を確認した。災害廃棄物は混合状態のもの、木くず、金属くず、石こうボードその他壁材、ガラス類などに細かく分類され、適切に管理されていた。胆振東部地震では土砂崩れにともなって被災した家屋が多く、土砂と混合されている状態で現地に仮置きされている状態であった。一般に混合状態の災害廃棄物の仮置きで、温度上昇とその後の発火の恐れがあるため、サーモグラフィで温度を測定したが、高温状態は確認できなかった。これは積み上げ高さが低く、放熱しやすい状態であり、かつ堆積期間が1ヶ月以内と短いために、高温になる可能性は低いと思われた。

図2に示した混合廃棄物の仮置場に堆積された廃棄物の量が増加すると、土砂混じりの混合廃棄物の分別も困難になると予想されるため、現地での簡易的な分級が可能となる施設の整備が望ましいと思われる。

既報<sup>1)</sup>で示したように北海道内では災害廃棄物の処理処分における埋立処分の比率が道外に比べてやや高い状態にあるため、発生量の多い混合状態の廃棄物の分別が必要であると推察された。



図1 発災後3週目(2018/9/27)の仮置場



図2 発災後10ヶ月目(2019/7/4)の仮置場

### 3 北海道における災害廃棄物発生原単位の推定について

災害廃棄物の処理処分において、適切に分別して、焼却・リサイクルを行い、かつ埋立処分量を減らすためには、発災直後からの災害廃棄物の分別収集、仮置場での分別の徹底を行う必要があるが、災害廃棄物の発生量と質を把握する必要がある。近年は災害廃棄物処理計画が各自治体によって策定されることが多いが、道外の事例に基づいた災害災害廃棄物発生原単位の報告は多いが、既報<sup>1)</sup>で示したように北海道内の地域特性を考慮したものはほとんどない。今回現地調査を行った被災自治体では、町が建設した住宅の詳細な建築材料に基づき、被災家屋の災害廃棄物発生原単位を推定していた。

被災家屋の災害廃棄物発生原単位を表1に示した。表に示したように全壊家屋では約72トンの災害廃棄物の発生が推定され、コンクリートが65%と最も多く、次に木材が10%、衛生陶器が9%などとなっている。この推定では家屋内の家具や廃家電などの生活必需品の廃棄物は含まれていない。環境省による災害廃棄物の発生推定では、半壊家屋の災害廃棄物発生量は全壊の20%、一部損壊家屋では10%としている事例を参考にし、表1に示したとおりに推定した。

表1に示した災害廃棄物発生原単位を用いて、胆振東部3町（厚真、安平、むかわ）での被災家屋数に基づいて、災害廃棄物発生量を推定した。災害廃棄物の総発生量は77,000トンと推定された。この量はこの結果では一部損壊の被災家屋で発生する災害廃棄物量が比較的多いが、環境省の推定では多いが、一部損壊家屋では全壊の10%としている仮定に基づいており、このような発生が実際に起こりうるのかは現場での確認が必要である。

次に、すでに被災家屋の解体に伴う災害廃棄物の発生量の把握が行われており、その結果について示す。約100戸の全壊家屋の解体による災害廃棄物の発生量の結果を図3に示す。平均は87トン/戸であり、最大で230トン、最小で11トンと極めて大きな差が生じていた。これは被災家屋が住居だけでなく、併設

表1 災害廃棄物発生原単位推定

品目	全壊a		半壊b*	一部損壊c**
	重量[t]	組成[%]	重量[t]	重量[t]
可燃	木材	6.9	9.7	
	壁材	1.9	2.6	
	床材	1.4	2.0	
	可燃ごみ	-		
不燃	断熱材	0.9	1.3	
	石膏ボード	2.8	3.8	
	屋根材	0.4	0.6	
	ガラス・陶器	0.2	0.3	
	コンクリート	46.5	64.9	
	アスファルト	-		
	サイディング	3.0	4.2	
	金属くず	0.4	0.6	
	衛生陶器	6.4	8.9	
	廃プラ	0.3	0.5	
	不燃ごみ	-		
	廃家電	-		
	混合廃棄物	0.6	0.8	
計	71.6	100.0	14.3	7.2

※ b = a x 0.2 c = a x 0.1

表2 胆振東部3町の被災状況（戸数）

	全壊	半壊	一部損壊
厚真	224	314	1,090
安平	93	356	2,092
むかわ	33	139	2,432
合計	350	809	5,614

表3 胆振東部3町の被災状況（戸数）

	全壊	半壊	一部損壊	計
厚真	16,038	4,496	7,804	28,339
安平	6,659	5,098	14,979	26,735
むかわ	2,363	1,990	17,413	21,766
合計	25,060	11,585	40,196	76,841

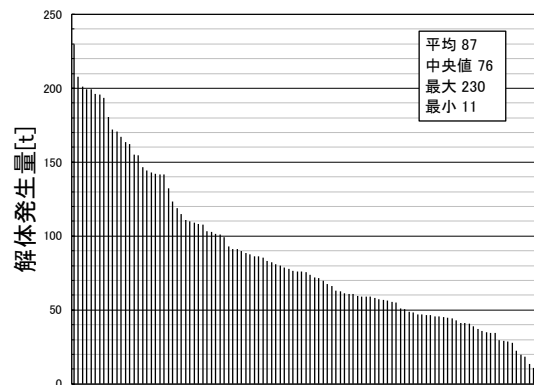


図3 全壊家屋の解体に伴う災害廃棄物発生量(t/戸)



表 4 災害廃棄物発生原単位実績

品目	全壊		
	重量[t]	組成[%]	
可燃	木材	17.0	19.5
	壁材		
	床材		
	可燃ごみ		
不燃	断熱材		
	石膏ボード	1.2	1.4
	屋根材		
	ガラス・陶器	1.9	2.2
	コンクリート	41.4	47.4
	アスファルト		
	サイディング	0.6	0.7
	金属くず	2.3	2.6
	衛生陶器		
	廃プラ	0.6	0.7
	不燃ごみ		
	廃家電	0.2	0.2
	混合廃棄物	22.2	25.4
計	87.4	100.0	

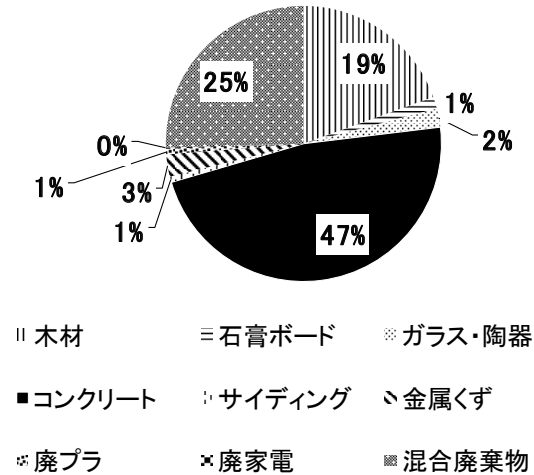


図 4 全壊家屋の解体に伴う災害廃棄物組成

されていた非住居も含まれていたためと思われる。このため、再度ヒアリングを実施して、解体家屋の状態を把握し、住居と非住居の災害廃棄物発生を分けて推定することが必要であることがわかった。ただし、被災時のおおよその災害廃棄物発生量を推定する上では平均値 87 トン/戸が前述した町営住宅の建築材料に基づく推定量の 72 トン/戸にほぼ一致していることから、発災当初の災害廃棄物発生量推定には使うことができると思われる。一方、災害廃棄物の組成については、図 4 に示した。最も多くを占めていたのはコンクリートが 47%、木材が 19%、混合廃棄物が 25% 等であった。推定結果と比較すると、混合廃棄物が多くなっていたが、これは分類上明確にできない状態で排出されるものが多く、表 1 に示していたもののうち、衛生陶器や断熱材等が混合状態で排出されていたのではないかと思われる。廃棄物処理処分を考えた場合には、このような混合廃棄物が最も埋立処分される可能性が高いため、このような混合廃棄物の分別を仮置場でいかに実施するかが課題であると思われる。

#### 4 まとめ

本研究の結果をまとめると、

##### (1) 現地調査

廃棄物処理処分の概要を把握し、災害廃棄物仮置き場調査は安全に管理されていた。

##### (2) 災害廃棄物の発生量予測

町営住宅の建築材料に基づく災害廃棄物発生原単位は 72 トン/戸程度であった。また、組成としてはコンクリートが 65%・木材が 10% を占めていた。その結果、胆振東部 3 町での災害廃棄物発生量は 7,700 トンになる可能性があることが推察された。

##### (3) 災害廃棄物の実態調査

全壊家屋の解体に伴う災害廃棄物発生量を約 100 戸の住宅で測定された結果、全壊家屋で平均 87 トン/戸、最大 230 トン/戸、最小 11 トン/戸であった。また、組成としてはコンクリートが 47%、木材が 19%、混合廃棄物が 25% を占めていた。推定結果と比較すると、混合廃棄物が多くなっていた。

現地での調査を継続し、災害廃棄物発生量の推定精度の検討を今後行う予定である。

#### 文献

- (1) 吉田英樹, 北海道における災害廃棄物処理処分の調査, 室蘭工業大学紀要, 67, 29-32 (2018-03-23)
- (2) 平成 30 年北海道胆振東部地震に係る被害状況等について (平成 31 年 1 月 28 日), 防災情報のページ, 内閣府ホームページ [http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin\\_hokkaido/index.html](http://www.bousai.go.jp/updates/h30jishin_hokkaido/index.html)

## 北海道胆振東部地震後の生徒への継時的心身影響調査

前田 潤\*<sup>1</sup>

(原稿受付日 令和元年 11 月 8 日 論文受理日 令和 2 年 2 月 20 日)

The Longitudinal Research of Students' Psychosomatic Influence  
after Hokkaido East Iburi Earthquake in 2018

Jun MAEDA

(Received 8<sup>th</sup> November 2019, Accepted 20<sup>th</sup> February 2020)

## Abstract

After Hokkaido East Iburi Earthquake, longitudinal research data (2 weeks, 1 month, 2 months and 6 months later) by questionnaire of junior high and high school student in the affected area were investigated. Data shows high school student represent higher than junior high school student's stress level. And stress level is decreasing according to time elapse, however after big after-shock, most of stress level become higher than after first-shock, especially irritative and feel illness response. Stress response is easy to recover by stressful same event even after 6 month later.

Keywords : East Iburi Earthquake in 2018, Longitudinal Research, Student

## 1 はじめに

災害は人々に甚大なる被害をもたらす一方、心身にも深く影響を残すことが知られている。我が国では、1993年の北海道南西沖地震で初めて災害後の子供たちの心身の状態に関する調査が行われ<sup>(1)</sup>、1995年の阪神淡路大震災後には、「こころ（心）のケア」が注目されるようになり、PTSDという精神疾患が広く知られるようになった<sup>(2)</sup>。その後、こころのケア活動の重要性の認識が進み、災害支援の専門機関である日本赤十字社も、2003年には災害支援活動の柱の一つに「こころのケア」を挙げ、救護要員教育に力を入れるようになる。これは、国際赤十字・赤月社連盟（IFRC）が1993年に心理支援センターをコペンハーゲンに開設して、IFRCの国際支援に心理支援を導入し、心理支援から心理社会的支援へと発展させていく流れに対応するものであった。こうした中で国際機関が共同して2007年に、緊急事態におけ

\*1 室蘭工業大学 ひと文化系領域

る精神保健及び心理社会的支援についてのガイドラインをまとめ<sup>(3)</sup>、国際緊急支援での標準的な指針がいわゆる「こころのケア」でも共有されることとなったのである。

トラウマ反応と喪失による悲嘆は、災害後にもたらされる異常な出来事に対する正常反応である<sup>(4)</sup>。災害に見舞われた人々の多くが災害直後には孤立無援感や無力感を味わい、大きな被害のために心身に不調をきたすことがあるが、基本的な生活の基盤を取り戻し、家族生活や仕事、そして地域が正常化するに従って回復していく力を持っているのである<sup>(5)</sup>。この回復の力を特別にレジリエンスと呼ぶが、被害の程度、正常化の程度、元々の経験の違いなどによって十分にレジリエンスが発揮できず、心身の不調が回復せず、または悪化させてしまうことがある。

トラウマ反応には、過覚醒、麻痺回避、侵入・再体験、解離という反応があり、さらに喪失による悲嘆反応、抑うつ、自責感などの辛い考えに苛まれる<sup>(6)</sup>。直後はこれらの反応は全て正常反応であっても、時間が経過し、周囲がある程度正常化しても回復せず、日常生活に支障をきたすようになると、専門的介入が必要となる。そうならないためには、心理教育とストレスマネジメントを早期に行い、孤立無援感や無力感を解消できる人々との繋がりの実感が持てるよう予防的な社会的介入が必要で、有効だと言われている<sup>(7)</sup>。

そのため、災害直後から、人々の心身の状態がどのように変化していくかを追跡し、時間が経過するに従って調査し、必要かつ適切な介入や働きかけを行うことが必要となる。理論的には以上のような理由で調査と適切な介入が必要であることは概ね承認されているが、実際には、災害による被災者が多く、甚大な被害の中で誰がどのように調査を行い、予防的措置や適切な支援を行うかが大きな課題となる。

## 2 研究概要

### 2.1 目的

本研究は、2018年に北海道胆振東部で発生した地震災害が若年者の心身に及ぼす影響を、継時的に調査し、その推移を見ることを目的としている。実際に彫られたデータは、調査をする目的だけでなく、必要な場合には適切な支援を行うためにスクリーニングをするためのデータとして得られたものである。

本研究で扱うデータは、災害から2週間後、1ヶ月後、2ヶ月後、半年後と継時的かつやや不規則に実施された調査データであり、生徒の心身の状態について学年別、校種別にストレス反応がどのように推移していくか、そしてその推移から災害後の心身の状態の流れを検討する。

### 2.2 方法

災害後の調査は、調査のための調査ではなく、当該被災地域に何らかの形で直接寄与するものとなることが求められる。今回の被災地域である胆振地域のすべての小中高等学校には、緊急措置として災害直後からスクールカウンセラー(SC)が派遣された。北海道教育局は北海道臨床心理士会及び北海道SC協議会と共同して、被災地でのSC活動に一定のガイドラインを提示し、また、心身の状態を把握するために使用するべき健康アンケートという調査票を提案した。これに従って幾つかの学校で同一の調査票が用いられることになった。

本研究の研究代表者もSCとして派遣され、幾つかの小中高等学校でスクールカウンセリング活動に携わることで、これらデータの取得や集計や分析に携わり、実際の支援活動に関ることができた。さらに、本研究に当たって室蘭工業大学の「平成30年度北海道胆振東部地震災害緊急調査支援補助事業」により、被災地の小中高等学校に入ったSCとの会議に出席あるいは主催、地域や学校関係者への教育研修事業で心理教育およびアンケートの必要性の理解促進のための資料作りを実施した。

本研究では、研究代表者がSCとして入った高校と、他のSCが入った同一の調査票で調査を実施した中学校からのデータが用いられている。これらのデータは、調査票は各学校の責任のもとに担任が生徒に配り、回答後、担任が回収。それをSCや養護教諭がエクセルデータに入力。エクセルデータだけでは個人の特長が不可能な形でデータ化したものを養護教諭やSCが集計、分析をした。その結果は、各学校や生徒保護者に共有して、心理教育に活用されている。また、ハイリスクと思われる生徒には、養護教諭から介入の検討が行われ、SCとの個別面接が実施されてもいる。

なお、本研究のために使用されたデータは全て匿名化されており、各学校責任者の了解の下に使用したものである。

使用した健康アンケートは、日本臨床心理士会と日本心理臨床学会が作成したもので、質問項目は「なかなか眠ることができない」「むしゃくしゃしたり、イライラしたり、かっとなったりする」「夜中に目が覚めて眠れない」「頭やお腹が痛かったり、からだの調子が悪い」「不安になったり悲しくなったりする」「食事がおいしくないし、食べたくない」という6つの項目である。これに対し、回答は「ない」「少しある」「(毎日) ある」の3件式となっている。さらに「そのほかに困っていること」「イライラを小さくしたり、少しでもホッしたりすること」の自由記述もあるが、今回の研究対象とはしていない。

### 2.3 結果

結果は、すべての質問項目に対する回答を、「ない」を0点、「(少し) ある」を1点、「(毎日) ある」を2点と数値化して集計した。それゆえ、全員が「(毎日) ある」だと、平均が2点となり、その場合は2点/満点2点で100%であるとして%表記で表を作っている。

#### 2.3.1 校種別比較-中学と高校

中学校はA中学校、高校はB高等学校と表記している。A中学校での調査とB高等学校の調査日は、全く同一ではないが、2018年9月6日の発災後中学校ではおおよそ1ヶ月後の10月5日と2ヶ月後の11月7日に、高校では2週間後の9月19日と、おおよそ2ヶ月後の10月23日に、そして半年後の3月12日に調査が実施された。縦軸は%、横軸はそれぞれの回答項目である。

対象となる中学生の人数は40名で、高校は59名であった。男女別の集計は行っていない。

中学校では、全生徒数が40名で、全員が「(毎日) ある」と答えたら総得点が80点となるので、10%という数値だとすると全生徒の総得点が8点であったことを示し、「(毎日) ある」との回答が4人かもしれず、「(少し) ある」との回答が8人かもしれない。そういう点で%から回答のばらつきはわからないが、全体の回答傾向は見ることができる。

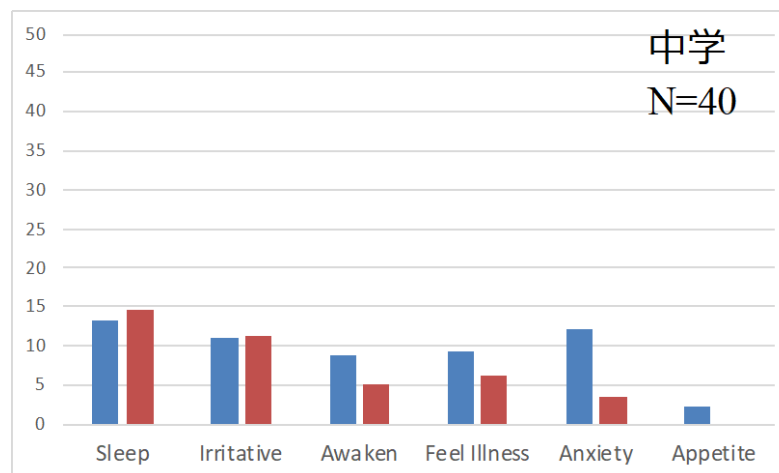


図1 : A中学校 1ヶ月後 (10月5日) と2ヶ月後 (11月7日) のアンケート結果



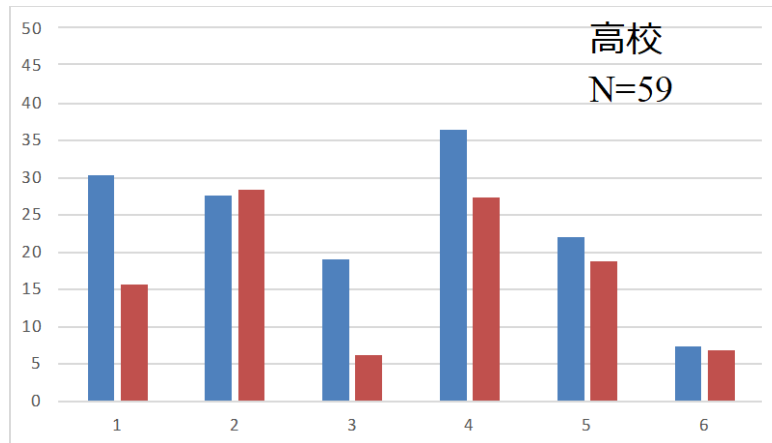


図2：B高等学校 2週間後（9月19日）と2ヶ月後（10月23日）のアンケート結果

### 2.3.2 B高校2週間後、2ヶ月後、6ヶ月後 学年別比較

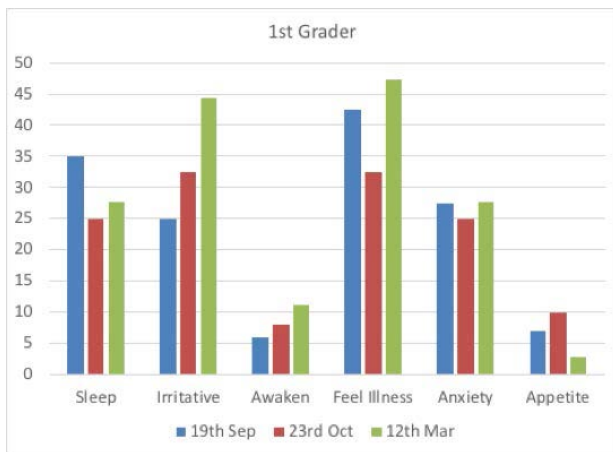


図3：1年生のアンケート結果

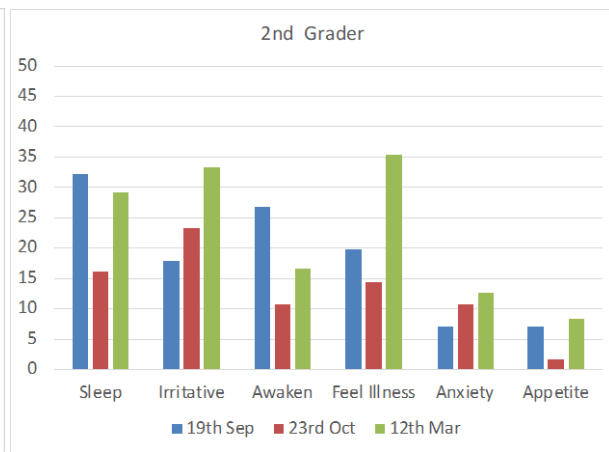


図4：2年生のアンケート結果

B高等学校では、発災から約6ヶ月後の3月17日にもアンケート調査を実施することができた。しかし、3年生はすでに卒業していたため、得られたのは在校生の1年生と2年生のみであった。

図3と図4は、1年生と2年生の3回の異なる時期のデータである。縦軸は%で横軸は回答項目である。

## 3 考察

アンケート結果は、ストレス反応についての自覚の程度を示していると考えられる。そこで、ここでは、災害後のストレス反応の自覚の現れと、その中学校と高等学校の比較分析、時間経過に従った自覚の現れの変化について考察したい。

### 3.1 ストレスの現れ

災害から2週間後、1ヶ月後のアンケートの回答傾向からみると、ストレス反応は、不眠、イライラ、体調不良感と不安として自覚される傾向にある。食欲はあまり影響を受けていない。高校生のデータから、睡眠は1ヶ月もすると急激に改善されるが、イライラ、体調不良感と不安というストレス反応の自覚があまり改善されていない。

### 3.2 中学生と高校生の比較

アンケートが実施された時期が若干違っているが、中学生と高校生の結果を比較すると、一見して明らかに高校生が、いずれも高い回答傾向にある。ただし、中学生は地震被害が大きかった被災地に居住しているが、高校生は、半数以上が地震による人的被害や家屋の被害がなかった地域に居住しており、

被災地外から通学している生徒が多い。それにもかかわらず回答項目得点が高い理由は何であろうか？

中学生と高校生という年齢的差異、災害地に居住しているか否か、その場合、災害地に居住していることがストレス反応の現れの自覚の程度を下げる要因となる、ということになる。あるいは、高校生の一人が災害で死亡しており、そうした喪失からくる悲嘆が高校生全体のストレス反応の自覚程度を高めているということも考えられる。

### 3.3 時間経過に従ったストレス反応の自覚程度の変化

半年後のデータは B 高校の 1 年生と 2 年生だけのものである。注目されるのは、1 年生と 2 年生で回答傾向に若干の違いはあるが、半年後の方がストレス反応の自覚の程度が高くなっている回答が散見されることである。特に、不眠とイライラと体調不良感は、災害直後よりも高くなっている。

半年もの時間が経過してストレス反応の自覚が自然に大きく高まったとは考えにくく、この半年後（3 月 12 日）のアンケートの前の 2 月 21 日に最大震度 6 弱の大きな余震があり、この余震が、ストレス反応の自覚の程度を高くしたのではないかと考えられる。

中でもイライラと体調不良感は、災害直後よりも高くなっており、余震が、最初の地震よりも大きくストレス反応を高めることがあることを示すものとして注目されるデータである。

## 4 まとめ

今回得られたデータによると、災害後のストレス反応は、不眠、イライラ、体調不良感や不安となって現れやすく、時間経過によってそれらの反応は減じていくが、大きな余震後には本震後よりも高いストレス反応となって蘇ることが示された。本震から半年も経過してもなお、容易にストレス反応が蘇りやすいことから、心身のストレス反応を減じるためのいわゆる「こころのケア」、あるいは心理教育やストレスマネジメントは何年にもわたって求められるということが出来る。

また、中学生よりも高校生でストレス反応が高く自覚されていることは、災害ストレスは、年齢が高い方があらわれやすいことを示す可能性があり、また、被害に見舞われたというだけでなく、直接被害を受けなかった地域から被災地に通い続けることや、仲間を失ったという喪失体験がストレス反応を高めることを示しているのかもしれない。

今回得られたデータは調査のための調査ではなく、SC という活動を通じて得られたものであるため、地域の研究者であるからこそ得られた貴重なデータだということができる。また、結果的には、比較可能な学校数は少なかったが、ただ単に SC として被災地で活動をしただけでなく、大学の事業費によって自分の範囲を超えて、多くの SC などの実務家や学校関係者に呼びかけ、幅広い協力や理解を得ることができた、という点でも貴重なデータと思われる。

## 文献

- (1) 藤森和美,藤森立男,北海道南西沖地震被災者の心理的サポートシステムの構築に関する研究,北海道教育大学紀要(第I部C),第45巻1号,1994,p139-149.
- (2) 加藤寛,こころのケアの始まりとその後,翔べ フェニックスII-防災・減災社会の構築,2015,p365-387.
- (3) IASC guideline for mental health and psychosocial support in the emergency settings,2007.
- (4) 槇島敏治,前田潤,災害時のこころのケア,2004,日本赤十字社.
- (5) 宅香菜子,レジリエンスと PTG (心的外傷後成長) (特集レジリエンス)-レジリエンスのための臨床実践,臨床心理学,第17巻5号,2017,p654-658.
- (6) 日本心理臨床学会編,心理臨床学事典,丸善,2011.
- (7) 全国赤十字臨床心理技術者の会編,赤十字の心理臨床 赤十字の実践,勁草書房,2013.

表 1 : 健康アンケート

健康アンケート		年 月 日		
名前	男 ・ 女	年	月	日
あなたの最近の「からだ」と「こころ」の健康について、教えてください。				
睡眠や食事について、工夫していることがあれば教えてください。				
イライラを小さくする工夫もあれば教えてください。				
	この3日間に、次のことがどれくらいありましたか。あてはまるところに○をしてください。	ない	少し ある	毎日 ある
1	なかなか、眠ることができない。	ない	少し	ある
2	むしゃくしゃしたり、イライラしたり、かっとなったりする。	ない	少し	ある
3	夜中に目がさめて眠れない。	ない	少し	ある
4	頭やお腹が痛かったり、からだの調子が悪い。	ない	少し	ある
5	不安になったり、悲しくなったりする。	ない	少し	ある
6	食事がおいしくないし、食べたくない。	ない	少し	ある
睡眠や食事そのほかのことについて、困っていることがあれば、教えてください。				
イライラを小さくする工夫や、少しでも「ほっとする」ことがあれば、教えてください。				
* 日本臨床心理士会・日本心理臨床学会作成版参考				

# Energy Cooperation in Battery-Free Wireless Communications with Radio Frequency Energy Harvesting

He LI<sup>\*1</sup>, Kaoru OTA<sup>\*1</sup> and Mianxiong DONG<sup>\*1</sup>

(Received 17<sup>th</sup> November 2019, Accepted 20<sup>th</sup> February 2020)

## Abstract

Radio frequency (RF) energy harvesting techniques are becoming a potential method to power battery-free wireless networks. In RF energy harvesting communications, energy cooperation enables shaping and optimization of the energy arrivals at the energy-receiving node to improve the overall system performance. In this paper, we proposed an energy cooperation scheme that enables energy cooperation in battery-free wireless networks with RF harvesting. We first study the battery-free wireless network with RF energy harvesting then state the problem that optimizing the system performance with limited harvesting energy through new energy cooperation protocol. Finally, from the extensive simulation results, our energy cooperation protocol performs better than the original battery-free wireless network solution.

Keywords: Battery-free networks, Energy cooperation, RF energy harvesting

---

## 1 INTRODUCTION

Battery-free wireless networks avoid the battery replacement of the traditional wireless networks, which are applied for more applications, e.g., wireless sensor networks<sup>(1, 2)</sup>, Internet of Things (IoT)<sup>(3, 4)</sup>, and the fifth generation communication networks<sup>(5)</sup>. In battery-free wireless networks, the nodes harvest energy from the environment for the wireless communications, which can supply power infinitely<sup>(6, 7)</sup>.

Recent years, radio frequency (RF) energy harvesting is playing an important role in wireless networks that wireless nodes can harvest energy from RF waves to extend network lifetime<sup>(8, 9, 10)</sup>. For battery-free wireless networks, RF harvesting is also considered as an emerging technology to maintain data communications<sup>(11)</sup>. Since RF energy sources are discontinuous distributed, some wireless nodes are hard to harvest enough energy. In general wireless networks, as the nodes in wireless networks have batteries to store energy, it is possible to maintain the network through careful energy management<sup>(12, 13)</sup>. However, as wireless nodes need continuous energy supplement, battery-free networks are difficult to work well on simple energy management<sup>(14)</sup>.

Energy cooperation is a potential solution to enable battery-free wireless networks with RF harvesting. Because of the intermittency of RF energy distribution, some wireless nodes will harvest more than necessary energy<sup>(15)</sup>. Energy cooperation means the wireless nodes with substantial energy can share their energy to those energy deprived nodes, which is an efficient methodology to improve the network performance of general wireless networks. As the nodes in battery-free are not able to store excessive energy, energy cooperation needs more dedicated control to improve the energy efficiency.

In this paper, we propose an energy cooperation scheme to improve the network performance of battery-free wireless networks. We first study the battery-free wireless networks with RF energy harvesting and introduce

---

\*1 Department of Sciences and Informatics, Muroran Institute of Technology



energy cooperation into the communication protocol. Then, we formulate the problem to minimize the overall latency of the given battery-free wireless network with RF energy harvesting. We solve the problem of the latency optimization with an energy cooperation protocol. We also formulate and analyze the efficiency of the energy cooperation protocol in the given battery-free wireless network. For evaluating the energy cooperation performance, we take extensive simulations and the numerical results show the network latency is decreased by our protocol.

The main contributions of this paper are summarized as follows.

- We first study the energy cooperation to optimize the network performance of battery-free wireless networks with RF energy harvesting. Since RF energy powering battery-free networking is a prospective technology, our work is the first work to optimize the network performance through energy cooperation.
- We then design the energy cooperation protocol to minimize the network latency of the battery-free wireless network. It is a challenging problem which needs to understand thoroughly the impact of energy harvesting and cooperation in the battery-free wireless network.
- We take the performance evaluation of the energy cooperation protocol with extensive simulations with settings from realistic battery-free wireless networks. We also compare our pricing strategy with the original network and the results show that our protocol decreases the network latency.

The rest of this paper is summarized as follows. Section 2 reviews the related work. Our network scenario and motivations are introduced in Section 3. Section 4 presents the problem formulation. An optimal energy cooperation protocol is proposed in Section 5. Section 6 gives the simulation results. Finally, Section 7 concludes this paper and give the future work.

## 2 RELATED WORK

In this section, we first introduce some main technologies of RF harvesting in battery-free wireless networks. Then, we discuss some energy cooperation strategies with RF harvesting.

### 2.1 RF energy harvesting in battery-free wireless networks

Some previous works focus on the design and implementation of battery-free wireless devices with RF energy harvesting. Radio frequency identification (RFID) applications are considered as an important area of battery-free devices.<sup>(16)</sup> proposed a programmable battery-free sensing and computational platform for sensor-enhanced RFID applications. They extend the maximum operational range of RFID sensing to 4.3m and provide a communication channel based on RFID reader physical layer.

Harvesting ambient RF energy is an important method for powering battery-free devices.<sup>(17)</sup> first analyzed the spectrum opportunities for harvesting energy from ambient radio waves. Through their analysis, harvesting RF energy from ambient radio waves shows acceptable efficiency for powering battery-free devices. Thus,<sup>(18)</sup> designed a battery-free device powered by harvesting RF energy from indoor WiFi access points. Even though they improved the energy harvesting efficiency, the harvested power is not enough for wireless communication.

Harvest energy from terrestrial television (TV) broadcasts is a perpetual power source for battery-free systems.<sup>(19)</sup> presented an RF energy harvesting battery-free device to harvest energy from the TV broadcast. They design a large log-periodic antenna to harvest 500-600 MHz TV signals and produce enough power for sensing and communication. From the result, the harvested power is also limited for maintaining a battery-free wireless network.

Some researchers introduce wireless communications into battery-free devices.<sup>(20)</sup> proposed a body area sensor node chip powered by both RF and thermoelectric power. In their design, the frequency-multiplying transmitter can provide a maximum data rate of 200kbps. However, the authors only implemented a single node system and the communication range is limited by harvesting ambient RF energy.

Thus, as a wireless network needs higher energy supplement than ambient RF energy harvesting, energy transmitters or chargers are deployed for energy transferring. Previous studies proposed efficient solutions for wireless rechargeable sensor networks<sup>(21, 22, 23, 24, 25)</sup>. Although these works focus on batteries charging on wireless nodes, RF energy transferring or charging shows enough capacity for powering battery-free systems. Therefore,<sup>(26)</sup> studied a battery-free wireless sensor network powered by RF energy chargers. They present a well-designed RF energy charger placement to minimize the number of chargers. Their research shows that powering battery-free wireless networks through additional RF chargers or energy transmitters is an efficient solution.

### 2.2 Energy cooperation through RF energy harvesting

Energy cooperation is an efficient methodology to improve the device energy supplement through RF energy harvesting.<sup>(27)</sup> first studied energy cooperation in the wireless communications then proposed a generalized two-dimensional directional water-filling algorithm to obtain the boundary of the energy capacity regions. Based on this research,<sup>(28)</sup> presented a class of optimal energy cooperation policies in a multi-source relay channel model with energy harvesting transmitters. They presented a unidirectional energy cooperation scheme which is more

appropriate for the practical scenarios. The energy cooperation shows enough efficiency on energy transferring.

Energy cooperation is also able to improve the network performance.<sup>(29)</sup> studied the classic three-node Gaussian relay channel with decode-and-forward relaying. For maximizing the throughput, they proposed a two-stage power allocation algorithm to obtain the optimal solution. However, the three-node network is not so practical for general wireless networks.

More studies focus on energy cooperation in more complex networks. For example,<sup>(30)</sup> proposed an energy cooperation model between base stations in cellular networks. They design an optimal energy cooperation policy for minimizing the energy consumption of base stations.<sup>(31)</sup> studied an emerging wireless powered communication network which is similar to a cellular network. They proposed an optimal strategy to improve the network performance through the energy cooperation.

Furthermore, as the frequency for energy transferring is usually different from data transmission for minimum interference, some researchers proposed energy cooperation which is independent of data communications.<sup>(32)</sup> proposed an energy and information cooperation scheme in RF powered cognitive radio networks. A primary network can provide both information and energy to a secondary network with RF energy harvesting, and the secondary network assists the primary transmission. In their network settings, the RF energy transferring and the data transmission is divided into two distinguished levels. From their simulation results, the energy and information cooperation improves the both primary and secondary system.

From discussed works, the energy cooperation shows promising efficiency in RF energy harvesting systems. Therefore, in this paper, we try to introduce the energy cooperation into the battery-free wireless network with RF energy harvesting to improve the overall network performance.

### 3 BACKGROUND AND MOTIVATION

In this section, we first introduce the scenario of a battery-free wireless network with RF energy harvesting. Then, we discuss the motivations on the energy cooperation to improve the network performance.

#### 3.1 Battery-free wireless networks with RF energy harvesting

Because of the lower cost of maintenance and materials, battery-free devices are applied to build wireless networks, such as wireless sensor networks and Internet of Things. For powering battery-free wireless networks, RF energy harvesting shows better efficiency and available than other solutions such as solar radiation, the wind and kinetic, as battery-free devices can harvest RF energy in communications and the ambient RF energy is almost unaffected by environment.

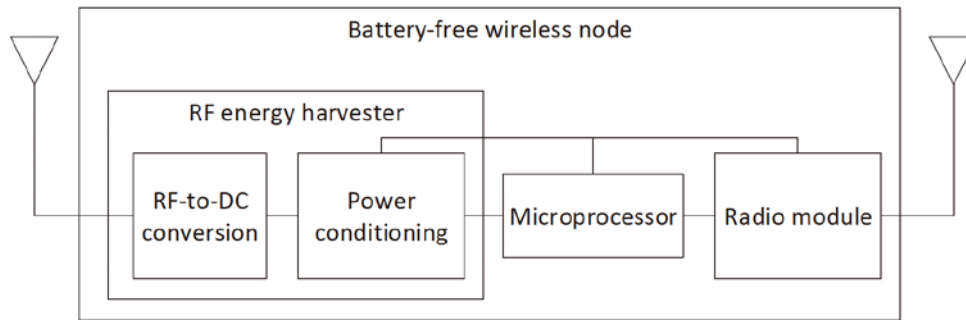


Fig.1 Battery-free wireless node with RF energy harvesting

We first discuss a typical structure of battery-free device with RF energy harvesting shown in Fig. 1. A battery-free device will have an independent antenna for energy harvesting and another one for communications. As the limited energy supplement, it is hard to apply the complex design that harvesting energy and communicating through a single antenna. The RF energy harvester will transfer the RF energy to DC power. The power conditioning in harvester stabilizes the power voltage for the workload. The rest parts are similar to an ordinary node in wireless communications, which includes a microprocessor and a radio module.

For powering these wireless nodes, there are two solutions. One solution is harvesting energy from ambient RF sources such as TV broadcast transmitters, cellular base stations, and AM/FM radio transmitters. Ambient RF sources can cover wide areas and provide stable energy supplement. However, for a single node, harvested energy is limited by the ambient RF sources. Moreover, as the ambient RF sources may operate on different frequencies, it needs different antennas to harvest energy.

Direct RF energy transferring can be used for powering battery-free devices out of the ambient RF energy coverage areas. In direct RF energy transferring, energy transmitters are set in the wireless network area and transfer energy to wireless nodes through a specific frequency. For example, 915 MHz is a reserved frequency for

wireless energy transferring and applied in some commercial solutions. Direct RF energy transferring provides high efficiency through directional antennas in a short distance while the energy is significantly attenuated by the distance. Moreover, the devices outside of the antenna beam are not able to harvest energy from the transmitter. Energy cooperation seems a potential solution to improve the efficiency.

### 3.2 Energy cooperation scenario

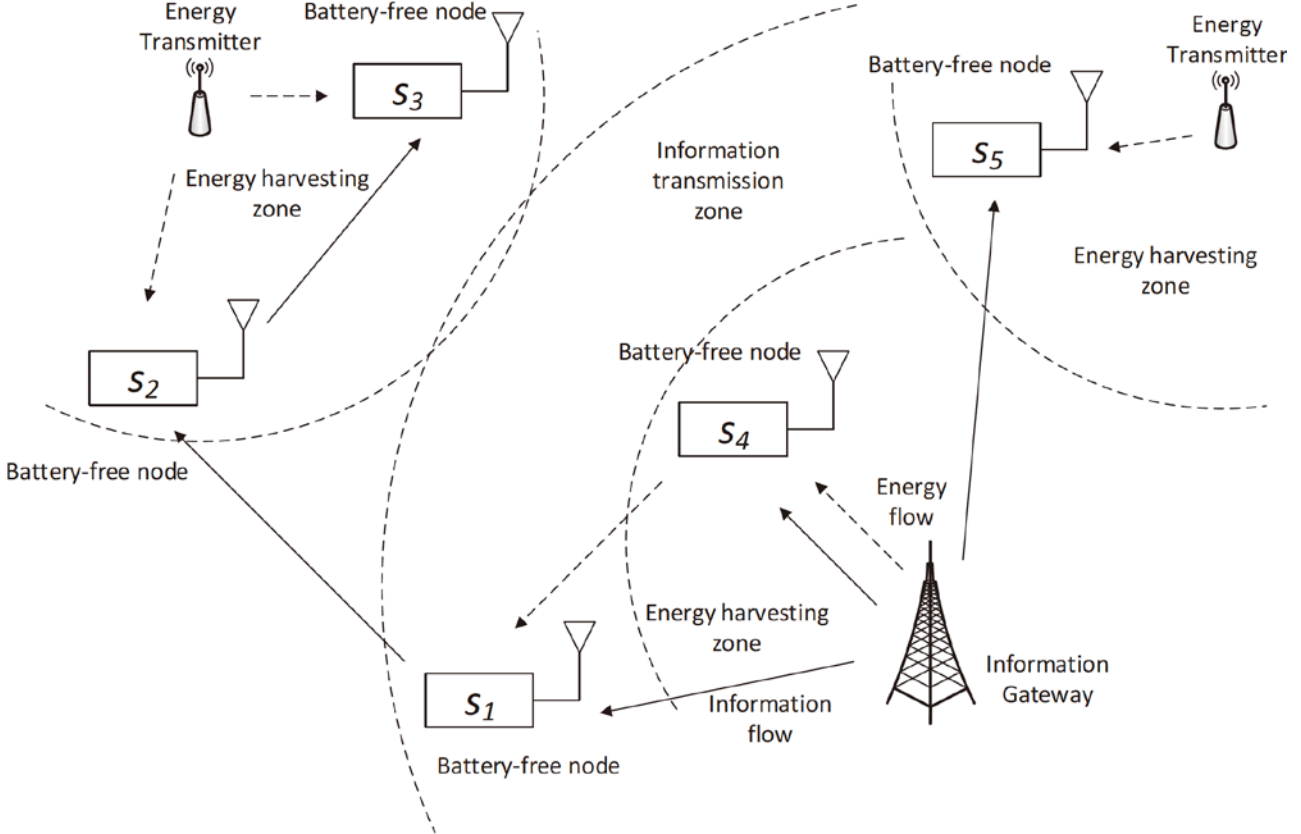


Fig.2 Energy cooperation with RF energy harvesting

In a battery-free network, as the energy is not distributed evenly, wireless nodes can cooperate with each other for energy transferring. As shown in Fig. 2, we use an example to describe the basic scenario of energy cooperation in a battery free network. In this energy cooperation scenario, there are battery-free wireless nodes, information gateway, and energy transmitter. We use  $s_1, s_2, s_3, s_4,$  and  $s_5$  to denote the wireless nodes. The information gateway transmits information to nodes in the information transmission zone and powers nodes in the energy harvesting zone while energy transmitters power the nearby nodes.

As the limited range of information transmission, wireless nodes will cooperate into an ad-hoc network to cover the nodes outside of the transmission range. For example, as node  $s_2$  and  $s_3$  are out of the information transmission zone, node  $s_1$  first transmit data to  $s_2$  then  $s_2$  transmit data to  $s_3$ . For energy harvesting, as the energy harvesting zone is much smaller than information transmission zone, additional energy transmitters are needed to cover the nodes without energy supplement. In the example, node  $s_2, s_3,$  and  $s_5$  harvest energy from energy transmitters. However, for power node  $s_1,$  node  $s_4$  have to transfer extra energy through RF antenna, which means energy cooperation.

In this case, there are several problems. First, as the battery-free design of wireless nodes, it is not allowed to buffer energy in batteries. Second, as the limited transmit power, it will need multiple nodes to power a single node. Third, the network performance is limited by the transmit power. As a result, we propose a solution to optimize the battery-free network through the energy cooperation protocol.

## 4 PROBLEM STATEMENT

In this section, we first model the energy cooperation in battery-free wireless networks with RF energy harvesting then state the problem of the energy cooperation strategy to minimize the network latency with a given energy supplement. We assume the frequencies of energy harvesting and information communications are distinct

with negligible interference. Each battery node has three antennas, in which one is for energy harvesting, one is for information communication, and one is for energy cooperation. We also assume the network connectivity and packet routing are not influenced by additional energy cooperation.

As shown in Fig. 2, we use  $S$  to denote the set of battery-free wireless nodes and  $s_i$  ( $i \in [1, |S|]$ ) to denote a node in set  $S$ . For node  $s_i$ , let  $H_i$  denote the harvesting antenna gain and  $R_i$  denote the communication antenna gain. For the information gateway, we use  $P_g$  to denote the transmit power for information transmission,  $G_g$  to denote the gain of the transmit antenna, and  $r_i$  to denote the distance between node  $s_i$  and information gateway. Let  $\lambda_c$  denote the information transmission frequency. Therefore, for each node  $s_i$ , we use  $P_i^g$  to denote the received power from the gateway, given by

$$P_i^g = P_g \cdot \frac{G_g \cdot R_i \cdot \lambda_c^2}{(4 \cdot \pi \cdot r_i)^2 \cdot L} \quad (1)$$

where  $L$  is the path loss factor.

For the energy harvesting, we use  $B$  to denote the set of energy transmitters and  $b_j$  ( $j \in [1, |B|]$ ) to denote a transmitter in set  $B$ . For energy transmitter  $b_j$ , let  $P_j$  denote the transmit power for energy harvesting,  $G_j$  to denote the antenna gain, and  $r_{ij}$  to denote the distance from node  $s_i$ . Let  $\lambda_e$  denote the energy harvesting frequency. Therefore, for each node  $s_i$ , we use  $P_{ij}^b$  to denote the received power from energy transmitter  $b_j$  to node  $s_i$ , give by

$$P_{ij}^b = P_j \cdot \frac{G_j \cdot H_i \cdot \lambda_e^2}{(4 \cdot \pi \cdot r_{ij})^2 \cdot L} \quad (2)$$

Then, we study the original network performance without energy cooperation. We first study the transmit power of a single node. Let  $P_i^p$  denote the power consumption of the chips and related circuit in node  $s_i$ . Let  $\eta_i$  denote the energy efficiency from the harvesting antenna to the node  $s_i$ . We use  $P_i^e$  to denote the input energy of the node  $s_i$  as

$$P_i^e = \sum_{j=1}^{|B|} P_{ij}^b \cdot \eta_i - P_i^p \quad (3)$$

For the communication between two nodes, let  $P_{ik}^r$  denote the input energy of node  $s_i$  received from node  $s_k$ , given by

$$P_{ik}^r = P_k^e \cdot \frac{R_k \cdot R_i \cdot \lambda_c^2}{(4 \cdot \pi \cdot r_{ik})^2 \cdot L} \quad (4)$$

where  $r_{ik}$  is the distance between node  $s_i$  and  $s_k$ .

Then, we study the data rate with the input energy. As we assume the network uses quadrature phase-shift keying (QPSK) modulation, let  $P_{ik}^x$  denote the bit error rate (BER) for node  $s_i$  receiving signal from node  $s_k$ , given by

$$P_{ik}^x = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}}\right) \quad (5)$$

where  $Q(\cdot)$  is a scaled form of the complementary Gaussian error function,  $E_b$  is energy per bit, and  $N_0/2$  is the noise power spectral density.

As a low BER is required for the data communications, let  $P_x$  denote the required BER and  $P_{ik}^x \leq P_x$  for node  $s_i$  receives data from node  $s_k$ . Now we study the relationship between BER and received power for node  $s_i$  receives data from node  $s_k$  as

$$\frac{P_{ik}^r}{N_i \cdot P_f} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{fb_{ik}}{B_i^w} \quad (6)$$

where  $P_f$  is the fading margin,  $N_i$  is the noise power of node  $s_i$ ,  $fb_{ik}$  is the bit rate of the data transmission from node  $s_i$  to  $s_k$ , and  $B_i^w$  is the channel bandwidth of node  $i$ .

As  $N_i = K \cdot T \cdot B_i^w + N_i^f$  where  $K$  is Boltzmann's constant,  $T$  is temperature,  $N_i^f$  is the noise figure of node  $s_i$ , the value of  $fb_{ik}$  is sufficient as



$$fb_{ik} \leq \frac{2 \cdot B_i^w \cdot P_i^r}{(Q^{-1}(P_x))^2 \cdot (K \cdot T \cdot B_i^w + N_i^f) \cdot P_f} \quad (7)$$

Similarly, let  $fb_i$  denote the bit rate from the information gateway to node  $s_i$ , give by

$$fb_i \leq \frac{2 \cdot B_i^w \cdot P_i^g}{(Q^{-1}(P_x))^2 \cdot (K \cdot T \cdot B_i^w + N_i^f) \cdot P_f} \quad (8)$$

Now, with the harvested energy from cooperation, we study the data rate from node  $s_i$  to a given node  $s_k$ .

We use  $C_k$  to denote the antenna gain for energy cooperation of node  $s_k$ . For node  $s_i$ , let  $P_{ik}^h$  denote the harvested energy from node  $k$  with energy cooperation, give by

$$P_i^r = P_i^e - P_i^h \quad (9)$$

Therefore, with energy cooperation, the overall input energy  $P_i^e$  is calculate as

$$P_{ik}^h = P_i^h \cdot \frac{H_i \cdot C_k \cdot \lambda_e^2}{(4 \cdot \pi \cdot r_{ik})^2 \cdot L} \quad (10)$$

Thus, we study the energy cooperation in this network. We use  $P_i^h$  to denote the power for energy cooperation. With  $P_i^h$ , let  $P_i^r$  denote the transmit power of node  $s_i$ , given by

$$P_i^e = \left( \sum_{j=1}^{|B|} P_{ij}^b + \sum_{k=1}^{|S|} P_{ik}^h \right) \cdot \eta_i - P_i^h - P_i^p \quad (11)$$

where  $k \in [1, |S|]$ .

We study the transmission latency of the battery-free wireless network with energy cooperation. In the energy cooperation scenario, each node transmits the extra energy in energy harvesting to others, in which the energy level for communications is not changed. Thus, the forwarding path in energy cooperation remains the same with general battery-free communications. Let  $R_i$  denote the forwarding path from the information gateway to node  $s_i$ . Therefore, we use  $d_i$  to denote the latency of transmitting one packet from the information gateway to node  $s_i$ , given by

$$d_i = \frac{l_p}{fb_1} + \sum_{k=2}^{|R_i|} \frac{l_p}{fb_{k(k+1)}} \quad (12)$$

where  $s_{k,k=1,2,\dots,|R_i|}$  is the nodes in forwarding path  $R_i$  and  $l_p$  is the packet size.

**The problem of energy cooperation in the battery-free wireless network with RF energy harvesting (ECBWN):** given a battery-free wireless network consisting of a set of battery-free wireless nodes, an information gateway, and a set of energy transmitters, the ECBWN problem attempts to adjust the output energy for energy cooperation of each battery-free wireless node to minimum the transmission latency.

## 5 Energy Cooperation Protocol

In this section, we propose the energy cooperation protocol to solve the ECBWN problem. We first describe the design of our protocol then analyze the performance in a given battery-free wireless network.

### 5.1 Protocol design

As shown in Algorithm 1, we design a protocol for energy cooperation in battery-free communications. First, if the node receives one or more energy cooperation requests, the protocol sets the output power for energy cooperation equal to the input power. We first set output power  $P_i^h$  for energy cooperation to input energy  $P_i^e$ . Then, the node will sleep until a packet comes.

When the node receives a packet, the node will put the received packet into the transmit queue for the future forwarding. If the communication protocol and RF module are duplex, the node will send the packet to the transmit queue simultaneously. For half-duplex networks, the node will wait all packets are received. In our scenario, we assume all communications between battery-free nodes are full duplex.

For transmitting packet, as the node needs enough transmit energy, output energy  $P_i^h$  is decreased and more energy is reserved for transmitting packets. As input energy  $P_i^e$  is dynamically varying with the energy cooperation scheme, the node will adjust  $P_i^h$  through an iterative calculation. For multiple nodes sending data or harvesting energy, we assume there is a simple collision avoidance mechanism in each battery node. Thus, in our protocol, the node will stop sending packets when the channel is not idle.

The minimal voltage is the voltage for the radio module send packets with the lowest power. The normal voltage is the voltage for the radio module and microprocessor working in the normal status. If the voltage is lower than normal voltage, the node will multicast an energy request with the lowest power. If the voltage becomes lower than minimal voltage, the node will sleep until the voltage recovery.

---

**ALGORITHM 1:** Energy cooperation protocol
 

---

**Input:** Node  $s_i$   
**Output:** Output power  $P_i^h$  for energy cooperation

```

repeat
  if Receive cooperation request then
     $P_i^h \leftarrow P_i^e$ ;
  end
  repeat
    for packet  $p_{ik}$  in transmit queue do
      while  $P_i^h > 0$  and  $fb_{ik} \leq fb_{max}$  do
         $P_i^h \leftarrow P_i^h - \Delta P$ ;
      end
      Send packet  $p_{ik}$ ;
    end
  until Transmit queue is empty or Channel is idle;
  repeat
    Put input packet  $p_{ik}$  into transmit queue
  until Input packet is empty;
until Voltage < Normal voltage;
repeat
  repeat
    Multicast cooperation request;
  until Voltage < Minimal voltage;
  Sleep;
until Voltage > Normal voltage;
    
```

---

## 5.2 Performance analysis

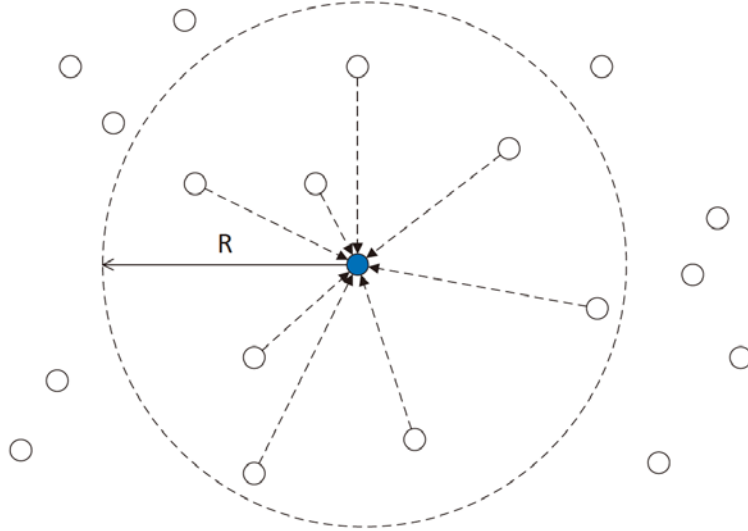


Fig. 3 Energy cooperation for a single node

Then, we try to analyze the performance of the energy cooperation protocol. We first assume all nodes are uniformly distributed in the network area and all nodes have the same parameters, which means  $H_1 = H_2 = \dots = H_{|S|} = H$ ,  $P_1^p = P_2^p = \dots = P_{|S|}^p = P^p$ ,  $C_1 = C_2 = \dots = C_{|S|} = C$ , and  $\eta_1 = \eta_2 = \dots = \eta_{|S|} = \eta$ . We use  $S$  to denote the size of the entire network area. As shown in Fig. 3, a single node can harvest energy from the nearby nodes. We use  $r^h$  to denote the maximum range of energy harvesting in cooperation. Thus, the area for energy

harvesting or node  $s_i$  is  $\pi \cdot (r^h)^2$ . Let  $S_i^h$  denote the node in the energy harvesting area of node  $s_i$ . Let  $E(|S_i^h|)$  denote expected number of node in  $S_i^h$ , given by

$$E(|S_i^h|) = \frac{\pi \cdot (r^h)^2}{S} \cdot |S|. \quad (13)$$

We use  $E(P_{r^h}^h)$  to denote the expected harvested energy of all nodes in energy cooperation and  $E(P_{r_j^h}^h)$  to denote expected energy that the nodes in the circle harvest from energy transmitter  $b_j$ . Expected harvested energy  $E(P_{r^h}^h)$  can be calculated as

$$E(P_{r^h}^h) \geq \sum_{j=1}^{|B|} E(P_{r_j^h}^h) \quad (14)$$

We first study the case that only node  $s_i$  is transmitting data while other nodes in the circle area are transferring energy for cooperation. Thus, as we assume the nodes in the circle area can harvest more power than inherent energy consumption, expected harvested energy  $E(P_{r^h}^h)$  is calculated as

$$E(P_{r^h}^h) \approx P_j \cdot \frac{G_j \cdot H^2 \cdot C \cdot \lambda_e^4 \cdot \eta^2 \cdot |S|}{64 \cdot \pi^4 \cdot S} \cdot \int_0^{r^h} \int_0^{r^h} \frac{1}{(x^2 + y^2) \cdot ((r_{ij} - x)^2 + y^2)} dx dy \quad (15)$$

We also assume the  $r^h \ll r_{ij}$  since the transferred energy from battery-free nodes is much smaller than the energy transmitter. Therefore, we can get the expected harvested energy  $E(P_{r^h}^h)$  as

$$E(P_{r^h}^h) \approx P_j \cdot \frac{G_j \cdot H^2 \cdot C \cdot \lambda_e^4 \cdot \eta^2 \cdot |S|}{32 \cdot \pi^3 \cdot r_{ij}^2 \cdot S} \cdot \log r^h \quad (16)$$

Then, with expected harvested energy from energy cooperation, let  $fb_{ik}^*$  denote the maximum data rate for node  $s_i$  transferring data to a given node  $k$ , given by

$$fb_{ik}^* = \frac{2 \cdot B_i^w \cdot P_{ik}^{r^*}}{(Q^{-1}(P_x))^2 \cdot (K \cdot T \cdot B_i^w + N_i^f) \cdot P_f} \quad (17)$$

where  $P_{ik}^{r^*}$  is the new input energy for data communications.

Therefore, let  $A_i$  denote the expected performance ratio of data rate between energy cooperation and original protocols when only node  $s_i$  is transferring data, given by

$$A_i = \frac{fb_{ik}^*}{fb_{ik}^r} = \frac{P_{ik}^{r^*}}{P_{ik}^r} = \frac{P_{ij}^{b^*}}{P_{ij}^b} = \frac{P_{ij}^b + E(P_{r^h}^h)}{P_{ij}^b} \geq 1 + \frac{H \cdot C \cdot \eta^2 \cdot |S| \cdot \log r^h}{2 \cdot \pi \cdot S} \quad (18)$$

where  $P_{ik}^{r^*}$  is the received energy of node  $s_k$  during data communications with node  $s_i$  through energy cooperation protocol.

Let  $J$  denote the expected number of hops for data forwarding. As the transmit power of the information gateway is much higher than nodes, the latency in the first hop is much smaller than latency in other hops. Let  $A$  denote the expected performance ratio of latency between energy cooperation and original protocols when only one forwarding path is transferring data, given by:

$$A \leq \frac{2 \cdot \pi \cdot S}{2 \cdot \pi \cdot S + H \cdot C \cdot \eta^2 \cdot |S| \cdot \log r^h}. \quad (19)$$

Now, we study our protocol performance with more throughput in the given network. We assume  $r^h$  is smaller than the distance in one hop and the information gateway only communicates with one single node. It is easy to know that for a given node, the expected ratio of the time for data transmission in entire period is  $\frac{1}{J}$ . Therefore,

in a given time slot, only  $\frac{1}{J}$  nodes are transmitting data and  $\frac{J-1}{J}$  nodes are waiting or receiving data. As a result, let  $B_i$  denote the expected performance ratio between energy cooperation and original protocols of node  $s_i$  with higher throughput, given by

$$B_i \geq 1 + \frac{H \cdot C \cdot \eta^2 \cdot |S| \cdot (J-1) \cdot \log r^h}{2 \cdot \pi \cdot J \cdot S}. \quad (20)$$

Finally, Let  $B$  denote the expected performance ratio of latency between energy cooperation and original

protocols, given by:

$$B \leq \frac{2 \cdot \pi \cdot J \cdot S}{2 \cdot \pi \cdot J \cdot S + H \cdot C \cdot \eta^2 \cdot |S| \cdot (J-1) \cdot \log r^h}. \quad (21)$$

## 6 PERFORMANCE EVALUATION

In this section, we first describe the simulation settings then provide simulation results to evaluate the performance of our proposed energy cooperation protocol in the battery-free wireless network with RF energy harvesting.

### 6.1 Simulation settings

To evaluate the performance in general cases, we generate random networks and compare the network latency of our protocol to the original network.

In our simulation, we run a python 2.7 script with the networkx library 1.6 on a desktop computer. After surveying many existing battery-free or RF harvesting systems, we select the parameters of the simulation from some practical works. We set the antenna gain of the energy transmitter is 15dBi on 915MHz, which is a common value of commercial products. The antenna gain for RF energy harvesting is set to 7.5dBi from<sup>(33)</sup>. We assume the gain antenna for energy cooperation is a replicate of the energy harvesting antenna. From some previous works, as the gain of communication antenna is usually very small with lower energy consumption, we set it to 0dBi in our simulations. We choose a 100×100 area for all simulations and the default number of nodes is set to 200. The default output power of energy transmitters is set to 30dBm or 1000mW. We put 4 energy transmitters in the area for powering all battery-free nodes. The information gateway is put in the center of the area. In the data communication, the information gateway sends packets to each node and at any time, we first assume there is only one packet is transmitted in the network. We also test the network latency when two packets are transmitted in the network. From the standard ARIB STD-T66<sup>(34)</sup>, we set the antenna gain of the information gateway is 2.14dBi and transmit power is 24dBm.

As there are no other energy cooperation methods for battery-free networks, we test the performance of an original mode without energy cooperation for comparison.

### 6.2 Numerical results

We first study the harvestable energy for each node. As shown in Fig. 4(a), we use four energy transmitters in 100×100m area and calculate the energy that a node can harvest in every position. We use different colors to show the value of harvestable energy. As the transferred power is quadratic attenuated by distance, the harvestable energy is significantly decreased below -20dBm when the distance from the transmitter becomes 10 meters. From the result show in Fig. 4(b), although each node only covers a small area, the energy cooperation protocol improves the harvestable energy even in the place far from the energy transmitters.

Then, we study the harvested energy of nodes with original mode and energy cooperation protocols. We test the harvested power of every node in the default settings and the cumulative distribution function (CDF) results are shown in Fig. 5. Compared to the original protocol, the harvested energy of each node is increased by the energy cooperation protocol. From the result, we find that the harvested power of node which harvests lower energy is increased more significantly than the one which harvests higher energy in the original mode. The harvested power of nodes which harvests -23dBm to -21dBm are increased most obviously by the energy cooperation solution.



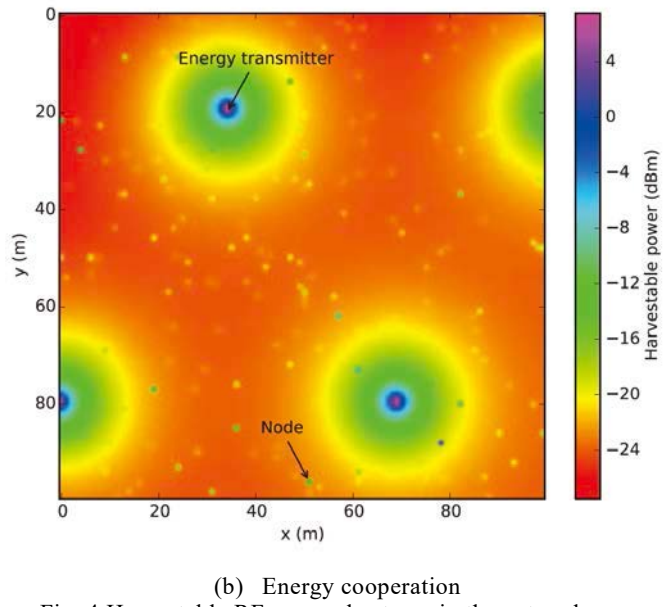
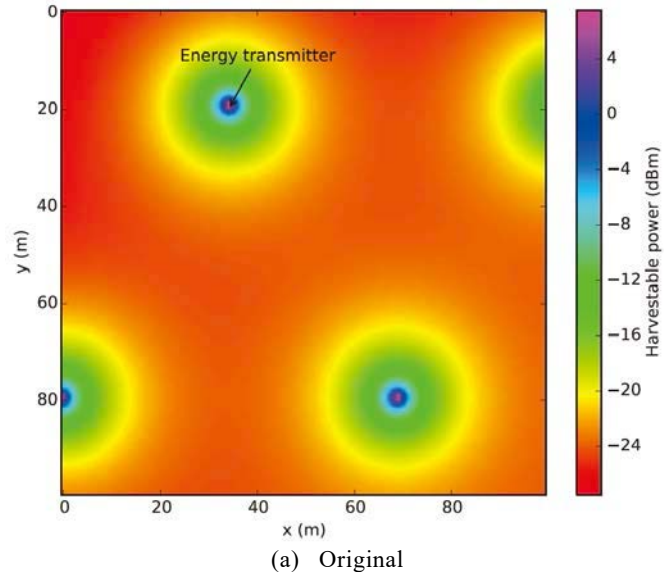


Fig. 4 Harvestable RF energy heatmap in the network area

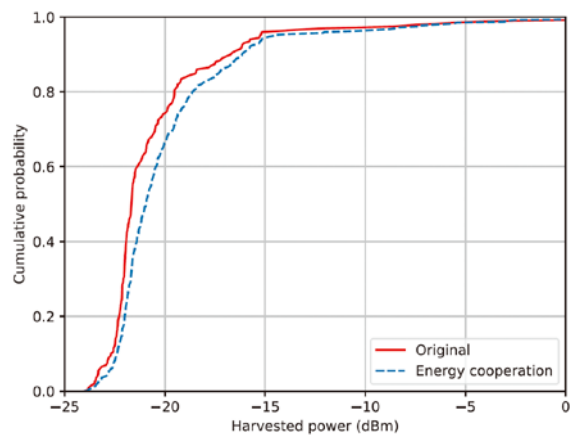


Fig. 5 Cumulative probability of each node harvested power

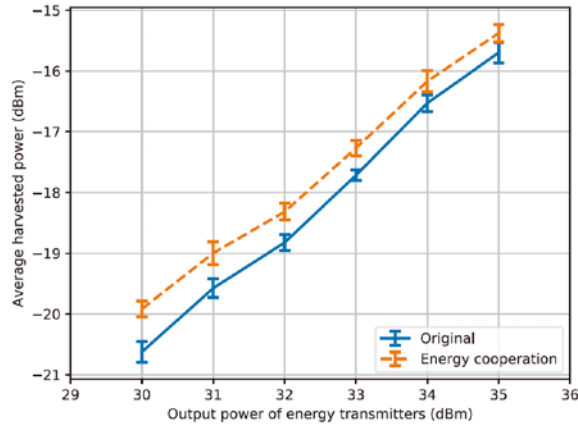


Fig. 6 Average harvested power with different output power of energy transmitters

We also test the average harvested power in the simulations. As shown in Fig. 6, we first test average harvested power with different output power settings of energy transmitters. We adjust the output power of energy transmitters from 30dBm to 35dBm. From the result, we find the energy cooperation increases the average harvested power of battery-free nodes. With a lower output power of energy transmitters, the average harvested power of battery-free nodes is increased more obvious. As a result, the energy cooperation protocol performs better with lower power from the energy transmitters.

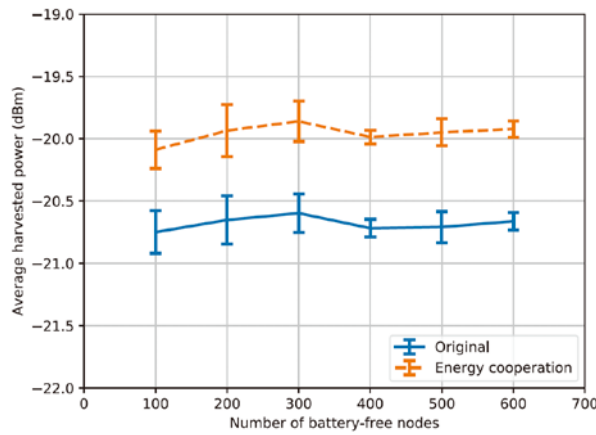


Fig. 7 Average harvested power with different number of nodes

Then, we test the average harvested power with different numbers of battery-free nodes. We maintain the output power of energy transmitters as 30dBm and change the number of battery-free nodes from 100 to 600 and increase 100 nodes in each step. As shown in Fig. 7, the average harvested power is slightly increased by energy cooperation protocol. With different numbers of nodes, the increased harvested power stays similar and average is about 0.5dBm or 1.12 times than the original mode.

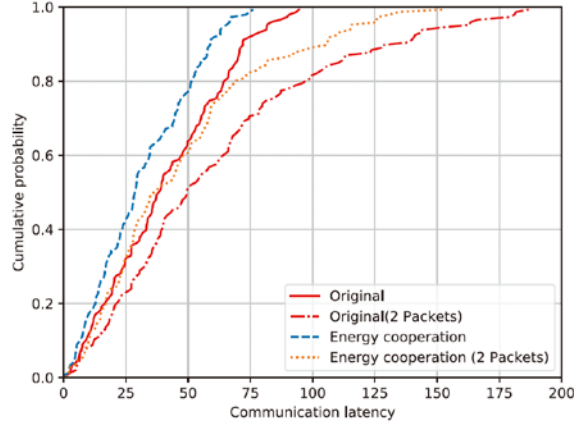


Fig. 8 Cumulative probability of communication latency

As this paper focus on the latency in data communications, we test the communication latency in the simulations. As shown in Fig. 8, we first study the cumulative probability of communication latency. From the result, the network latency is significantly decreased by the energy cooperation protocol. The network performance of nodes with higher latency is improved more obviously than nodes with lower latency. Thus, the energy cooperation protocol is a potential solution to improve the quality-of-service (QoS) of the battery-free wireless networks. Moreover, we also study network latency when two packets are being transmitted in the network. The network latency increases with transmitting more packets. With more packets transmitted in the network, energy cooperation still performs better than original model with lower network latency.

As shown in Fig. 9, we test the average communication latency with different output powers. We maintain the number of nodes is 200 and adjust the output energy of energy transmitters from 30dBm to 35dBm and add 1dBm in each step. The average latency is also significantly decreased by the energy cooperation protocol with different output powers of energy transmitters. The decreased average latency is about 4 ms with the output power of 30dBm. When the output power increased, as the overall network performance becomes better, the decreased average latency is not so obvious than the result of lower output energy.

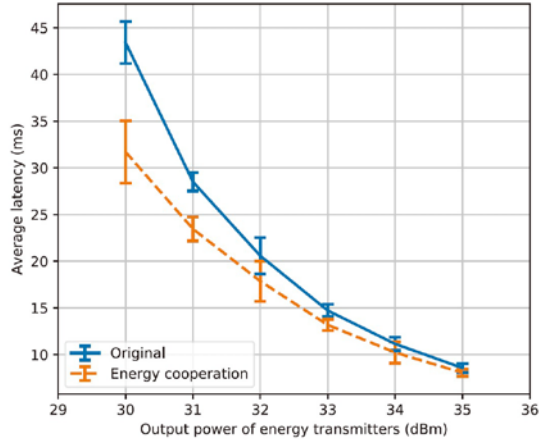


Fig. 9 Average latency with different output power of energy transmitters

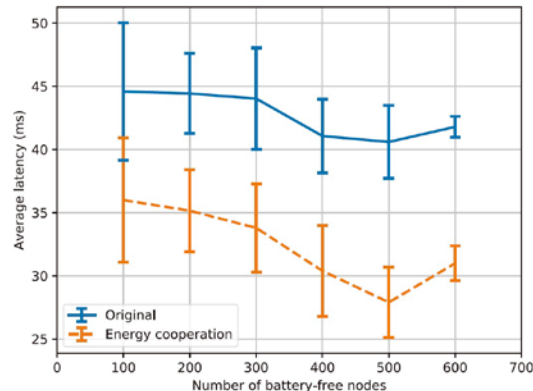


Fig. 10 Average latency with different number of nodes

We then adjust the number of nodes in the network and maintain the output power of energy transmitters stays 30dBm. We set the number of nodes from 100 to 600 and increase 100 in each step. As shown in Fig. 10, the average latency is significantly decreased by the energy cooperation protocol. When the number of nodes is less than 600, the decreased latency is increased with the increasing number of nodes. When the number of nodes is 600, the latency with both original and energy cooperation protocols slightly increases. We consider its reason is because the average number of forwarding hops is increased by the increasing number of nodes. As a result, the energy cooperation protocol can decrease the 5ms or about 15% of the average network latency.

## 7 Conclusion and Future Work

In this paper, we propose an energy cooperation scheme in battery-free wireless networks with RF energy harvesting to improve the network performance by decreasing the communication latency. We first introduce the scenario of the battery-free wireless network and RF energy harvesting and discuss the problem of the energy cooperation in this scenario. We state a problem to decrease the network latency by energy cooperation then design an energy cooperation protocol to solve the problem. We also theoretically analyze proposed protocol and evaluate its performance through extensive simulations. Both theoretical and numerical results show that our energy cooperation protocols perform better than the original network with shorter network latency.

In the future, we plan to implement a complete RF energy harvesting solution for battery-free networks to support energy cooperation. Meanwhile, it is signification to find appropriate routing protocol to combine the energy cooperation and packet forwarding. A deeper experiment with the real word testbed is also needed to evaluate the efficiency of the new energy cooperation protocol.

## ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP16K00117, JP15K15976, JP17K12669, KDDI Foundation, and Research Fund for Postdoctoral Program of Muroran Institute of Technology. Mianxiong Dong is the corresponding author.

## REFERENCES

- (1) M. Philipose, J. R. Smith, B. Jiang, A. Mamishev, S. Roy, K. Sundara-Rajan, *IEEE Pervasive Computing* 2005, 4, p37-45 10.1109/MPRV.2005.7.
- (2) Q. Zhang, Z. Chen, Y. Leng, *Int. J. Sen. Netw.* 2015, 18, p32--39 10.1504/IJSNET.2015.069871.
- (3) F. Mattern, C. Floerkemeier, in *From Active Data Management to Event-Based Systems and More: Papers in Honor of Alejandro Buchmann on the Occasion of His 60th Birthday*, ed. by K. Sachs, I. Petrov, P. Guerrero, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 242--259.
- (4) Q. Zhang, L. T. Yang, Z. Chen, P. Li, *Information Fusion* 2018, 39, p72 - 80 <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2017.04.002>.
- (5) S. Akbar, Y. Deng, A. Nallanathan, M. Elkashlan, 2015 *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Dec, 2015.
- (6) T. J. Kamierski, S. Beeby, *Energy Harvesting Systems: Principles, Modeling and Applications*. 1st ed., Springer Publishing Company, Incorporated, 2010.
- (7) Y. Zhang, S. He, J. Chen, *IEEE/ACM Trans. Netw.* 2016, 24, p1632--1646.



- (8) S. Chalasani, J. M. Conrad, IEEE SoutheastCon 2008, April, 2008.
- (9) S. Sudevalayam, P. Kulkarni, IEEE Communications Surveys Tutorials 2011, 13, p443-461 10.1109/SURV.2011.060710.00094.
- (10) X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, Z. Han, IEEE Communications Surveys Tutorials 2015, 17, p757-789 10.1109/COMST.2014.2368999.
- (11) A. N. Parks, A. P. Sample, Y. Zhao, J. R. Smith, Biomedical Wireless Technologies, Networks, and Sensing Systems (BioWireleSS), 2013 IEEE Topical Conference on, Jan, 2013.
- (12) H. Jabbar, Y. S. Song, T. T. Jeong, IEEE Transactions on Consumer Electronics 2010, 56, p247-253 10.1109/TCE.2010.5439152.
- (13) H. J. Visser, R. J. M. Vullers, Proceedings of the IEEE 2013, 101, p1410-1423 10.1109/JPROC.2013.2250891.
- (14) H. Liu, M. Bolic, A. Nayak, I. Stojmenovic, IEEE Network 2008, 22, p26-35 10.1109/MNET.2008.4694171.
- (15) B. Gurakan, O. Ozel, J. Yang, S. Ulukus, IEEE Transactions on Communications 2013, 61, p4884-4898 10.1109/TCOMM.2013.110113.130184.
- (16) A. P. Sample, D. J. Yeager, P. S. Powledge, A. V. Mamishev, J. R. Smith, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 2008, 57, p2608-2615 10.1109/TIM.2008.925019.
- (17) N. Barroca, H. M. Saraiva, P. T. Gouveia, J. Tavares, L. M. Borges, F. J. Velez, C. Loss, R. Salvado, P. Pinho, R. Gonçalves, N. BorgesCarvalho, R. Chavéz-Santiago, I. Balasingham, 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Sept, 2013.
- (18) U. Olgun, C. C. Chen, J. L. Volakis, Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, July, 2012.
- (19) R. J. Vyas, B. B. Cook, Y. Kawahara, M. M. Tentzeris, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 2013, 61, p2491-2505 10.1109/TMTT.2013.2258168.
- (20) F. Zhang, Y. Zhang, J. Silver, Y. Shakhsheer, M. Nagaraju, A. Klinefelter, J. Pandey, J. Boley, E. Carlson, A. Shrivastava, B. Otis, B. Calhoun, 2012 IEEE International Solid-State Circuits Conference, Feb, 2012.
- (21) M. Erol-Kantarci, H. T. Mouftah, Computers and Communications (ISCC), 2012 IEEE Symposium on, July, 2012.
- (22) L. Fu, P. Cheng, Y. Gu, J. Chen, T. He, INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE, April, 2013.
- (23) S. He, J. Chen, F. Jiang, D. K. Y. Yau, G. Xing, Y. Sun, IEEE Transactions on Mobile Computing 2013, 12, p1931-1942 10.1109/TMC.2012.161.
- (24) P. Cheng, S. He, F. Jiang, Y. Gu, J. Chen, IEEE Transactions on Wireless Communications 2013, 12, p3072-3084 10.1109/TWC.2013.050313.121691.
- (25) L. Fu, P. Cheng, Y. Gu, J. Chen, T. He, IEEE Transactions on Vehicular Technology 2016, 65, p278-291 10.1109/TVT.2015.2391119.
- (26) Y. Li, L. Fu, M. Chen, K. Chi, Y. h. Zhu, IEEE Communications Letters 2015, 19, p1802-1805 10.1109/LCOMM.2015.2468212.
- (27) B. Gurakan, O. Ozel, J. Yang, S. Ulukus, 2012 Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), Nov, 2012.
- (28) K. Tutuncuoglu, A. Yener, Information Theory Workshop (ITW), 2013 IEEE, Sept, 2013.
- (29) C. Huang, R. Zhang, S. Cui, IEEE Journal on Selected Areas in Communications 2013, 31, p1469-1479 10.1109/JSAC.2013.130811.
- (30) Y. K. Chia, S. Sun, R. Zhang, IEEE Transactions on Wireless Communications 2014, 13, p6996-7010 10.1109/TWC.2014.2339845.
- (31) H. Ju, R. Zhang, 2014 IEEE Global Communications Conference, Dec, 2014.
- (32) G. Zheng, Z. Ho, E. A. Jorswieck, B. Ottersten, IEEE Transactions on Signal Processing 2014, 62, p2290-2303 10.1109/TSP.2014.2310433.
- (33) H. Kitayoshi, K. Sawaya, VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, 2005., Sept, 2005.
- (34) A. K. Othman, K. M. Lee, H. Zen, W. A. W. Zainal, M. F. M. Sabri, 2009 International Conference on Ultra Modern Telecommunications Workshops, Oct, 2009.

学 術 論 文

# German Japanese Cultural Comparison of Breakfast Scenes in Films

Margit KRAUSE-ONO\*<sup>1</sup>

(Received 8<sup>th</sup> July 2019, Accepted 20<sup>th</sup> February 2020)

## Abstract

By comparing excerpts from the Japanese TV film 'Yuube no Curry, Ashita no Pan' and from the German TV film 'Die Freundin meiner Mutter', the meaning of breakfast for the respective cultures was worked out. A major goal is to illustrate the cultural background for the respective type of breakfast using frequently stated values or focal points of German or Japanese culture and thus to locate the relevance of such values in everyday life.

Keywords: Food, Culture, Communicative style, Cultural style

---

## 1 INTRODUCTION

Food plays an outstanding role in everyday communication, as Wierlacher (2013) has illustrated based on the three circles of culinary studies and hospitality developed by him. For these studies he also coined the term 'Kulinaristik'. In the second circle of this Wierlacher model it becomes clear that food in every culture is associated with signs, symbols, norms, rules and ways of speaking. In many cultures, food, its preparation, and consumption convey numerous messages which are often expressed both extra-verbally and non-verbally. Although Mehrabian (1972) already showed that this non-verbal part is very important in overall communication, it is rarely considered in the scientific analysis of everyday meals, especially breakfast. The respective cultural styles associated with this are rarely examined in this context (Wierlacher, 2018). The same applies to the aspect of time in communication, which, as Hall (1976) has already clearly pointed out, is of paramount importance in overall communication.

There are numerous detailed descriptions of meals, including breakfast, in literature. Just think of Thomas Mann's 'Die Buddenbrooks' or Heinrich Böll's 'Billiard um Halb zehn'. In both works the exact description of the breakfast scene is of great importance for the plot of the story.

However, the normal everyday breakfast is still rarely examined from an intercultural perspective (Wierlacher, 2018). The preparation and consumption of food are a total social phenomenon, as Mauss postulated as early as 1923, and carry all relevant aspects of the respective culture within these actions.

In this study, to return to Mehrabian (1972), the extra-verbal and non-verbal aspects of breakfast preparations in

---

\*1 College of Liberal Arts, Muroran Institute of Technology

two films will be examined, since they reveal much about the actual communicative and cultural styles of the respective cultures and societies. Although it seems problematic to equate cultures with nations as in this comparison, this procedure is still common practice and appears to many as "the best of all bad solutions" (Bolten 1999, p.13).

All cultures are based on common values, and some of them are universal. The difference is that each culture emphasizes these values differently. Usually a certain range of values is predominant, as well as several acceptable and unacceptable verbal and non-verbal behaviors. Every culture has its glasses through which the world is seen (Moosmüller, 1997). This does not mean that people have no choice in their behaviour or expression. It rather means that these cultural frameworks are set by the members of a culture, mostly based on their cultural and collective memory (Assmann, 1992). These frameworks represent a link between an individual member of a certain culture and all its members. There may be aspects that overlap with those of other cultures, but a dominant communicative style still constitutes every culture (Galtung, 1985).

## 2 BACKGROUND

### 2.1 German culture and its communicative style

Stereotypes about German behaviour and the German style of communication have always existed, as for other cultures too. E. T. Hall (1959, 1985) and M. Hall (1985) were the first scientists to document German cultural characteristics in their research on the handling of time, spatial behaviour and the context dependence of communication. They describe German culture as monochronic, low-context-oriented, order-loving, and emphasizing the appreciation of rules. In his comparative analysis of American and German communicative styles, Nees (2000) describes that participants in German culture prefer long analyses and explanations as much as thorough planning. He further states that many participants in German culture attach great importance to professional competence, cultivate a very direct style of communication and prefer individualistic traits in fact-oriented contexts. At the same time, he acknowledges that Germans are very consensual, but that consensus is achieved through direct communication in official conversations where it is important to express one's opinion. The strong content and fact orientation causes a reduction in the importance of the relationship aspects of communication. "Direct attacks on the content of an utterance are common, but attacks on the person are avoided through impersonal and objective communication" (Nees 2000, p.63). One reason for this specific characteristic of the German communication style is the fact that honesty in conversation is generally valued more highly through open expression of one's own opinion than personal relationships.

Contrastive studies of German and Japanese cultural behavior and communication styles emphasize the above-mentioned aspect of the directness of the German communicative style. Watanabe (2006) analyzed German Japanese business negotiations conducted in English. Her results show that German managers communicate in a very matter-of-fact manner, are focused on the topic at hand and make little reference to the previous speaker. An investigation by Hass et al (2017) of German students revealed similar auto-stereotypical assessments: they see themselves as direct, efficient as well as subject- and problem-solving-oriented. This is confirmed by Huijser in his book 'Managing Mindsets' (2011). The same cultural attitude can also be seen in the communicative style of news presenters (Tagesschau), the news content as well as the editing and camera work of this news programme (Krause-Ono, 2013), which is often dispassionate, distanced and under-laid with numbers. In summary, the German communication style and prevailing cultural characteristics can be characterized by a) a high degree of directness, b) a great appreciation of structures and rules, c) a clear distinction and separation between private space, time and professional life, and d) a pronounced factual orientation.

### 2.2 Japanese culture and its communicative style

Japanese have - in contrast to Germans - a clear idea of a specifically Japanese behaviour (Stahl, 1999). During the late Meiji period (1890-1912), certain characteristics regarded as Japanese were institutionalized, whether

through education, the media, or official orders (Gluck, 1985). Since then, a wealth of literature on Japanese uniqueness (Nihonjinron) has appeared (Sugimoto, 2001). The author also refers to the early studies, since their research results are still valid and recent publications (Hass et al, 2017) report similar results. Most authors argue that different schools and arts called *do* (way) in Japanese culture, such as *bushido* - the way of the warrior, *ken-do* - the way of the sword, or *chadō* - tea ceremony, or the proper way of tea, share a common cultural basis. They all involve not only the mastery of a technique, but also the mastery of a moral code or behaviour, including appropriate verbal and non-verbal expressions (Coulmas, 2003).

According to Doi (1971) and Nakane (1967), already in the early stages of the sociolinguistic development of a Japanese child (through the choice of words, expressions and the underlying cultural concepts), strong emphasis is placed on the correct form of reciprocal behaviour in interpersonal encounters, with particular emphasis on emotional importance. Meaning-distinctive concepts such as *amae* (indulgence) (Doi, 1971), *enryo* (restraint) (Inoue, 1977) and *haji* (shame or embarrassment) (Inoue, 1977) are all used to define the *self* as well as the *other(s)*. These as well as *sasshi* (the ability to understand and sense the unspoken) (Nakane, 1967) are closely linked to the concept of the *seken* (the other), which is the basic orientation for outwardly directed behaviour (Inoue, 1977). All authors stress that these concepts would not be so explicitly present or represented if the point of departure were only the self and not the others. However, these concepts do not describe static positions, but change according to the situation in which the individual finds himself. In other words, they are strongly situation- and context-bound.

In Japanese society, "...instead of recognizing a single social reality, there is rather a multitude of possible perspectives of the self as well as of social life. Interactions in Japanese society focus on the right choice made from numerous possibilities. In other words, what one says or does will be different in different situations, depending on how one defines one's own perspective towards the respective social other" (Bachnik 1986, p.69).

Condon (1984) further shows that loyalty and group orientation have a high value in Japanese culture. Schroll-Machl (2003) gives concrete examples of Japanese behaviour in business situations, which is often perceived by others as vague, indirect and very reserved. The real issue is often face saving (one's own and the other's), harmony and consensus orientation. This takes time, as it is necessary to gather a lot of information and to cultivate relationships. In communication, aspects of relationships take precedence over factual aspects. A study by Hass et al (2017) discovered that even young students avoid being in the foreground and tend to orient themselves towards the current in-group. Great importance is also attached to details and aesthetics in all situations (Krause-Ono, 2013).

### 3 THEORETICAL BASIS

These idiosyncratic tendencies in the communicative styles of the two cultures, as depicted above, are also reflected in the meals, especially breakfast. As already indicated in the introduction, the theoretical background of this can be found in Wierlacher's three-circle model of culinary studies, which can be seen in Figure 1.

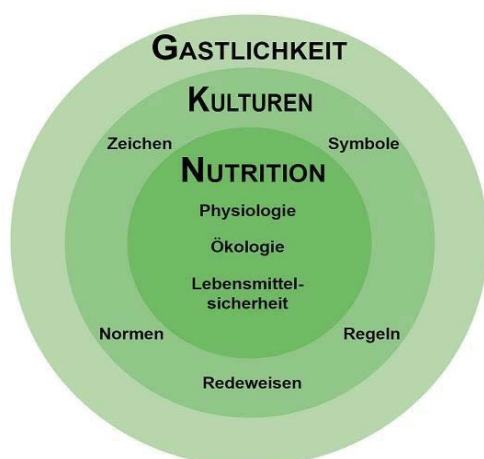


Figure 1: Strukturmodell der Kulinaristik (Structural model of Culinaristics)



Quote: "The innermost circle means nutrition, i.e. the physiological necessity to eat and drink. It includes ecological problems as well as questions of food safety. The second circle stands for the plurality of cultures. They turn the realm of necessity into a realm of diversity of meanings, rules, signs, norms, rituals, ways of speaking and symbols. The third and outermost circle represents hospitality. This is one of the oldest ways of communication with which people regulate their coexistence across cultural borders."(Wierlacher, 2018, p.13, translation by the author)

The second circle is most relevant for this study. It shows that communicative and cultural styles are reflected in meals. This will be demonstrated in this study through an analysis of breakfast preparation and its consumption in films. Meals in films must appear plausible and completely 'normal' to the viewer in order not to cause dissonance. Film sequences are therefore particularly suitable for an analysis of the respective cultural and communicative styles.

## 4 METHODOLOGY

This pilot study intends to illustrate that even in such inconspicuous, trivial situations as the preparation of breakfast, the cultural and communicative styles described above appear and presumably are the basis for the same. In the Japanese film 'Yuube no Curry, Ashita no pan' as well as in the German film 'Die Freundin meiner Mutter' we found breakfast preparation sequences of about the same length (66 and 50 seconds). Both sequences were without words and thus even more suitable for an intercultural comparison. The sequences were examined regarding the type of music, number, length and type of cuts. Since the sequences cannot be shown in an article, we have described the content of the individual cuts or scenes in order to make the following analysis comprehensible.

### 4.1 Information on the German TV film 'Die Freundin meiner Mutter' (The girlfriend of my mother)

The main characters are: the economically unsuccessful bookseller Jan, in his early 30s, shares an apartment with Hannah, his best friend since childhood. His successful and lesbian mother Viktoria, who supports him financially, would like to have a child with her partner Rosalie. Jan is supposed to be the sperm donor. Jan's father, an unsuccessful writer, lives in his wife's basement and takes care of the garden and laundry.

The script was mainly written by Martin Rehbock from an idea by the late Ilja Haller. The film is set in Hamburg. It is a comedy with an unusual theme, which is addressed in an uninhibited way. The film had a predominantly positive resonance with the audience. It contains several acts in which meals/food occur. Of these, a 50-second breakfast preparation was particularly useful for comparison with the Japanese film.

### 4.2 Information on the Japanese TV film 'Yuube no Curry, Ashita no Pan' (Yesterday's curry, tomorrow's bread)

The main characters are: Tetsuko Terayama, a 32-year-old employee who became a widow seven years ago. She lives with her also widowed father-in-law, a meteorologist and called Gifu by her, in his house. She was married to his son Kazuki for six years until he presumably died of cancer. Tetsuko's colleague Iwai would like to marry her. Oda, a neighbour, his wife and their 'hikikomori' daughter Takana (or Mumumu), a former flight attendant who, unable to smile, gave up her job and now almost never leaves the house.

The script was written by Izumi Kisara, a well-known Japanese writer. The scenes and actions are so natural and everyday for Japanese viewers they are completely salient and perceived as very familiar. Even more than in the German film, there are actions in which meals/food appear. The scene of the breakfast preparation was best suited for comparison.

## 5 RESULTS

### 5.1 The Japanese breakfast preparation

1st scene until 0'5": Close-up of a rice pot standing on a gas flame. It steams, splutters, and everything overflows despite the lid.

1st cut until 0'10": Close-up of the rice pot. Noises can be heard clearly and distinctly. No camera movements, no music, but the scene radiates life, warmth, closeness and energy.

2nd cut until 0'14": Close-up of a quaking green frog jumping on water plants.

3rd cut until 0'18": Half total shot of an outer wall and gate to a ground-level house / property behind it. Bushes, trees, laundry stands can be seen. From 0'15" on, music begins for the first time, individual tones plucked on guitar or violin can be heard gradually evolving into a simple calm melody. Simple piano strokes underline them and then take over the melody. Everything is very calm and slow. Frog in Japanese means 'Kaeru', which also means 'come/go home'.

4th cut until 0'25": The camera is fixed in a medium long shot. In the front Gifu is sitting at the dining table. On the right-hand side there are figures and other things on a windowsill. In the back part is the kitchen, Tetsuko is standing and cutting something on a sideboard. Open shelves and a refrigerator can be seen on the left-hand side. At the back is a wall with a window. In total there are three windows and the room is naturally well lit. Gifu puts the newspaper away, gets up from the chair, goes into the kitchen to the gas stove and adjusts the flame. Tetsuko is cutting something. Meanwhile, the music has become a quiet, simple melody plaid by a string instrument and a piano.

5th cut until 0'28": Close-up of the cucumber slices and the kitchen knife cutting them, which is held by Tetsuko's hand.

6th cut until 0'29": Medium long shot of Gifu taking the plate from the shelf on the left and placing it on the right next to the cucumber slices cut by Tetsuko. He briefly says '*hai*' (please).

7th cut until 0'33": Close-up of Tetsuko's fingers placing the aubergine and cucumber slices on the plate.

8th cut until 0'35": Close-up of a plate next to it, as well as the fried salmon slice, which is placed on it using of a turner and chopsticks.

9th cut until 0'37": Close-up of a bowl with natto plus the chopsticks with which Gifu stirs the natto.

10th cut until 0'45": Close-up of a pot with soup into which Tetsuko stirs miso using a ladle and chopsticks. After three seconds, the camera slowly moves up to Tetsuko's focused face. Stirring in his natto, Gifu walks past her from left to right towards the window.

11th cut until 0'53": Close-up of Gifu looking up out of the window while still stirring in his natto. In the background Tetsuko is turning from the gas stove on the left diagonally to the fridge behind Gifu. When Tetsuko opens the fridge, Gifu turns his head back to her, holding the bowl and the chopsticks in his hands. Tetsuko takes a plastic box and an egg out of the fridge. She gives the plastic box to Gifu, who is half turned towards her.

12th cut until 0'57": Close-up of a saucepan in which bacon is sizzling. The camera is motionless. Tetsuko's hands are cracking an egg and putting it onto the bacon. A kitchen clock shrills in the background. The gentle music ends here.

13th cut until 1' 0": Half close-up of Gifu standing in front of the rice pot saying 'wow'. Tetsuko is standing next to Gifu in front of the saucepan and holding chopsticks in her hand. Gifu picks up a towel to lift the lid off the rice pot. Tetsuko looks at him from the side.

14th cut until 1'03": Close-up of Gifu's right half of his face and Tetsuko frowning at him from the side.

15th cut until 1'06": Close-up of the lid that was removed with a towel and the freshly cooked and steaming rice in the pot. One hears Gifu saying 'oho'.

### 5.2 Summarizing the Japanese breakfast

Including the introductory scene, there are 15 cuts in 66 seconds. Almost all shots last more than 4 seconds. Food, its preparation, as well as the protagonists are shown in close-ups.

The atmosphere is calm, harmonious and without haste. The protagonists carry out the preparations calmly anticipating breakfast. The quiet music in the background accompanies their actions. The sounds of the kitchen, such as the spluttering rice pot, the slicing of the pickled vegetables, the sizzling of the bacon, the stirring of the miso or the stirring of the natto, can all be clearly heard and are even emphasized. The movements of the protagonists are calm and natural. It is a homely togetherness, so is every morning. Verbal communication is not needed.

The breakfast consists of rice, miso soup, fish, bacon with egg, pickled vegetables and natto. The food is in the center with many close-ups and aesthetic in its simplicity. There is no direct statement about the personal relationship of the protagonists, but the familiarity and liveliness of the everyday common action is emphasized in each cut.

It should also be mentioned that after 66 seconds Tetsuko says 'just a moment', but the following action is non-verbal again for 50 seconds and proceeds as follows:

Tetsuko takes Gifu's rice bowl and tips the rice of another bowl into his. She holds it out to him until he takes it, while she looks at him from the side all the time. Gifu slowly takes the bowl, looks at it and takes it to the dining-table. Tetsuko spoons rice from the rice pot into a bowl, takes it and walks past Gifu through two rooms to the house altar. She kneels in front of it, puts the bowl in front of a photo, and strikes a small gong. Then she folds her hands, lowers her head for 3-4 seconds, stands up and walks back. The camera zooms in on the photo of a young man on the house altar with a full rice bowl in front of his picture.

The dead are also provided with food at the same time as the living. And the next morning a living person eats the rice not eaten by the dead. To live and to prepare food together is part of everyday life and normal. The actions and motions are known. Everything is familiar. To trust and understand each other. There is contentment even without words.

### **5.3 The German breakfast preparation**

1st scene until 2": Long shot of cranes and ships in a harbour. The pictures are accompanied by upbeat instrumental music from the keyboard.

1st cut until 5": Long shot of cranes and ships. In the foreground there are branches and leaves of a shrub/tree in close-up and partly blurred.

The music for this sequence was composed by Tobias Wagner. It is peppy from the keyboard; the dynamic theme will be repeated throughout the breakfast preparation scene.

2nd cut until 15": Full shot of two diagonally opposite doors at the end of a corridor. From 6"-11" the left door opens, Jan comes out of his room, sleepy, in his striped blueish-yellow underpants and grey-brown T-shirt, half reaching for his crotch. He walks half towards the camera to the right across the hall, probably into the bathroom. From 12"-15", the right door opens, and Hannah emerges from her room a little restless wearing a short dressing gown. She goes left across the hall into the kitchen.

3rd cut to 16": close-up of Hannah. The camera travels from her hands holding the mocha pot up to her face. Her mouth is distorted because she cannot open the pot.

4th cut until 20": Close-up of her hands holding the mocha coffee pot, still trying to unscrew it.

5th cut until 21": Medium long shot of Hannah standing behind a shelf table. Behind her part of the kitchen with a blue wall, clock, sink, sideboard as well as shelves with spices etc. and kitchen utensils on hooks can be seen. Before her on the shelf table there are bananas and a bowl with grapes. Hannah cannot open the mocha coffee pot, her left hand holds the pot to the side.

6th cut until 22": Close-up of her hand holding the mocha coffee pot. The latter is taken dynamically by Jan's left hand.

7th cut until 26": Close-up of Jan going to the sink with the mocha coffee pot. Both he and Hannah are visible from behind. She takes a metal can containing ground coffee from the sideboard, and while she turns and places

the lid on the shelf table in front, he opens the mocha coffee pot over the sink.

8th cut until 27": Close-up of Hannah from shoulder to the back of her head. Her right hand takes from Jan's right hand/arm the hopper of the mocha coffee pot.

9th cut until 28-29": Close-up of her right hand tapping the coffee grounds from the hopper into an octagonal tin can.

10th cut until 29-30": Close-up of Jan's right hand holding the water-receptive part of the mocha coffee pot under the tap and filling it with water.

11th cut until 30-31": Close-up of Hannah's left hand holding the hopper. Her right hand spoons ground coffee powder from the can into the hopper. Her hand and the container are at the center. Hannah is standing at the shelf table.

12th cut until 32": Close-up of Jan who is visible from the shoulder halfway from behind. He is still standing unshaven over the sink and is yawning. On the wall in front of him there is a shelf with spice containers, a coffee grinder and behind it a picture with apples and pears. The running of water can be heard.

13th cut until 36": Medium close-up of both. Jan is standing in front of the sink on the left in the back, holding the container filled with water and is moving in Hannah's direction. She, having finished pouring coffee powder into the hopper in her left hand, now with her right hand puts the lid on the can. Then she turns towards Jan and with her right hand takes the water-filled lower part of the mocha coffee pot from his right hand. Hannah's left side is visible, and Jan is seen from behind.

14th cut until 37": Close-up of a hob on the gas stove where Jan is igniting fire with a lighter. The thumb and index finger of his hand holding the lighter are also visible. The flicking of the lighter is noticeable.

15th cut to 38": Medium close-up of a dynamic scene: Hannah moves to the left, closing the mocha coffee pot, Jan moves to the right to the sideboard, takes the cutting board with bread on it in both hands and places it on the shelf table in the foreground.

16th cut until 39": Close-up of Hannah's right hand placing the mocha coffee pot on the hob of the gas stove.

17th cut until 40": Close-up of Jan from the front. He is standing at the shelf table and raises his right hand. Behind him Hannah can be seen from behind in front of the gas stove. Her right arm goes to the right and is half covered by his right upper arm.

18th cut until 42": Close-up of Jan's outstretched right hand. Hannah's concentrated face is visible from the side. With her right hand she puts the handle of a bread knife into Jan's right hand. His hand grasps the handle.

19th cut until 43": Close-up of the cutting-board, of a piece of whole grain bread as well as Jan's left hand holding it and of the bread knife with which he cuts 2-3 slices.

20th cut until 47": Dynamic medium close-up of both. Jan in the center is still cutting the bread. Hannah on the right can be seen from behind. She takes three white plates from the top shelf on the wall, turns forward, takes one white plate with her right hand and places it on the shelf table.

21st cut until 48": Dynamic close-up: Her right hand places the plate in front of the chopping board on the shelf table. With his left hand, Jan tosses rather than lays three slices of bread on it. His right hand still holds the bread knife in his hand.

22nd cut until 49": Extreme low angle close-up of Jan on a motorbike. Both his hands are resting on the handlebars and he is wearing a helmet. His motorcycle light is on.

#### **5.4 Summarizing the German breakfast**

Including the introductory scene there are a total of 23 cuts in 49 seconds! Most cuts are very short and take only 1-2 seconds. Large compositions and close-ups dominate. Apart from the protagonists, mainly things and objects can be seen.

The mood is slightly tired. Nonetheless, even if something is troublesome, what has to be done will be done. This seems to be underlined by the upbeat, rhythmic, repetitive music. The beat accompanies the cuts as well as the movements of the protagonists. Even if the two are not in the best mood, they are a well-rehearsed team

preparing breakfast. Their movements flow smoothly into one another. Words are not necessary. Both are efficient and focused on their tasks.

The breakfast consists of coffee and bread, maybe also the bananas and grapes seen at the beginning. The latter is pure speculation though. The preparation of breakfast and its contents (coffee and bread) are purposeful. Everything is task-oriented, and the actions should be quick and efficient. The espresso or mocha should wake them up, the wholemeal bread should give them energy, so they can start working afterwards (final scene on moped). No statement is made about the personal relationship of the protagonists. The food or the meal itself is not emphasized. The focus is clearly on things and tasks.

## 6 DISCUSSION AND CONCLUSION

Both sequences manage without words and nevertheless clearly convey each culture's different communicative styles in everyday life. One can argue that they are only part of a film and thus posed. But even in a film, everyday situations can only go unchallenged if they agree with the everyday life of most of the viewers and thus can pass 'unnoticed'. This is the case in both films.

German breakfast preparation is characterized by a high degree of task orientation and efficiency. The individual sections show objects whose context is linear and simple. The fact that something is annoying is not necessarily hidden. Time-conscious, perfect and professional are further adjectives that come to mind. The electronic music which rhythmically drives the action and masks almost all other noises reinforces this impression. The necessary is done, but the food is rather spartan (coffee and bread). This preparation largely conveys the otherwise often described (Schroll-Machl, 2002) German communicative-cultural style.

The sequence of the Japanese breakfast preparation, however, is characterized by numerous interwoven aspects. The wordless but joint and interrelated preparation of different dishes is filled with familiarity, peace and serenity. Not only the protagonists and the food can be seen. Also, all other aspects, like the house, the kitchen itself, the arrangement of the things, the natural light as well as the simple music, which is restrained and thus clearly revealing of all aspects, are of great importance. All these details, in all their complexity, result in an aesthetic simplicity. Even the dead are not forgotten in everyday life but are part of life. There is no simple task orientation here. The context is too big to be manageable for a single person. Relationship orientation is indispensable. This breakfast preparation also shows quite clearly the often described (Huijser, 2011) Japanese communicative-cultural style.

The reproduction of an everyday life which is self-evident for many succeeds by appropriate camera attitude, camera guidance, recording length and the play of the actors. The communication expressed mainly non-verbally in the two analyzed sequences illustrates more than words the German as well as the Japanese communicative-cultural styles.

However, as this is only a pilot study, further studies and the inclusion of other cultures are necessary.

## REFERENCES

- (1) Assmann, J., *Das kulturelle Gedächtnis*. München: Verlag C.H. Beck, 1992.
- (2) Bachnik, J. M., Time, space and person in Japanese relationships. In Hendry, J./Webber, J. (Hrsg.): *Interpreting Japanese society: Anthropological approaches*. New York: Oxford University Press, 1986, 49-75.
- (3) Bolten, J., Interkulturelle Wirtschaftskommunikation: Forschungsstand und Perspektiven eines neuen Fachgebietes [Intercultural Business Communication: State of the Art and Perspectives of a New Research Field], *Wirtschaftsdeutsch international. Zeitschrift für sprachliche und interkulturelle Wirtschaftskommunikation*, 1, 1999, 9–25.
- (4) Coulmas, F., *Die Kultur Japans*. München: Verlag C. H. Beck, 2003.
- (5) Condon, J. C., *With respect to the Japanese*. Boston: Intercultural Press, 1984.
- (6) Doi, T., *Amae" no kouzou [Die Struktur von „amae]*. Tokyo: Kobundo, 1971.
- (7) Galtung, J., Struktur, Kultur und intellektueller Stil. Ein vergleichender Essay über sachsonische, teutonische, gallische und nipponische Wissenschaft. In Wierlacher, A. (Ed), *Das Fremde und das Eigene*. München: Judicium, 1985, 151-193.
- (8) Gluck, C., *Japan's Modern Myths*. Princeton: Princeton University Press, 1985.
- (9) Hall, E. T., *The Silent Language*. New York: Random House, 1959.



- (10) Hall, Edward T.: *Beyond Culture*. New York: Anchor, 1976.
- (11) Hall, E.T./Hall, M.R., *Hidden Differences: How to communicate with the Germans*. Hamburg: Stern Press, 1985.
- (12) Hass, J.; S. Waechter & M. Krause-Ono, The Dialectics of Auto- and Hetero-stereotypes in the Perception of German and Japanese Students. In *Muroran Memoirs* 66, 2017, 117-128.
- (13) Huijser, M., *The cultural advantage*. London: Intercultural Press, 2006.
- (14) Huijser, M. & D. Huijser, *Managing Mindsets*. Amsterdam: Ayn Press. 2011.
- (15) Inoue, T., “Sekentei“ no kouzou [Die Struktur des „sekentei“]. Tokyo: NHK Books, 1977.
- (16) Krause-Ono, M., Comparative Analysis of Three National Primetime TV News Broadcasts (Preliminary Results). In *Muroran Memoirs* 62, 2013, 101-111.
- (17) Lillge, C. (Ed.) & Meyer, A. (Ed.) (2015) *Interkulturelle Mahlzeiten. Kulinarische Begegnungen und Kommunikation in der Literatur*. Bielefeld: transcript Verlag. Retrieved 3 Jul. 2019, from [https://www.degruyter.com/view/product/46723\\_](https://www.degruyter.com/view/product/46723_)
- (18) Mauss, M., Die Gabe. Die Form und Funktion des Austauschs in archaischen Gesellschaften. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1923.
- (19) Mehrabian, Albert: *Nonverbal communication*. Aldine-Atherton: Chicago, 1972.
- (20) Moosmüller, A., *Kulturen in Interaktion. Deutsche und US-amerikanische Firmenentsandte in Japan*. Münster: Waxmann, 1997.
- (21) Nakane, C., *Tateshakai no ningenkankei [Human relations in a vertical society]*. Tokyo: Kodansha, 1967.
- (22) Nees, G., *Germany - Unravelling an Enigma*. Boston: Intercultural Press, 2000.
- (23) Schroll-Machl, S., *Die Deutschen – Wir Deutsche*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 2002.
- (24) Schroll-Machl, S., Deutschland. In: Thomas, A./Kammhuber, S./Schroll-Machl, S. (Hrsg.): *Handbuch Interkulturelle Kommunikation und Kooperation*, Bd 2. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 2003 72-89.
- (25) Stahl, G. K., Deutsch-japanische Managementkommunikation. Probleme und Gestaltungsmöglichkeiten. *Wirtschaftsdeutsch international. Zeitschrift für sprachliche und interkulturelle Wirtschaftskommunikation*, 1, 1999, 27-46.
- (26) Sugimoto, Y., *An Introduction to Japanese Society*. Melbourne: Cambridge University Press, 2001.
- (27) Watanabe, K., Framing in Intercultural Business Discourse: Differences Between German and Japanese Managers. *Intercultural Communication Review*, 4, 2006, 81-96.
- (28) Wierlacher, Alois: *Das Konzept Kulinaristik* In: *Kulinaristik* Nr. 5, 2013/2014, 6-11.
- (29) Wierlacher, A., *Kulinaristik des Frühstücks / Breakfast Across Cultures*. München: Judicium, 2018.

## 徳島方言における「ダロ」「ダー」「デ」「デー」について

島田 武<sup>\*1</sup>

(原稿受付日 令和元年 7 月 2 日 論文受理日 令和 2 年 2 月 20 日)

## On "Daro", "Daa", "De", and "Dee" in the Tokushima dialect

Takeshi SHIMADA

(Received 2<sup>nd</sup> July 2019, Accepted 20<sup>th</sup> February 2020)

## Abstract

This paper aims to describe the functional characteristics of four sentence-closing particles, "daro", "daa", "de", and "dee" in the dialect of Tokushima spoken in the eastern part of Shikoku, which is one of the four main islands of Japan. "Daro" has the function of supposition. "Daa" is an allomorph of "daro", which stands for inference and the request to agree to it. "De" has three functions: interrogation, presumption, and emphasis. "Dee" expresses the request for confirmation.

Keywords : sentence-closing particle, supposition, interrogation, inference, request for confirmation

## 1 はじめに

日本語を特徴付けている要素のひとつに、文末に生じる表現がある。それらは会話の中で、疑問、強調、同意、断定、推量など話者の感情や態度を表す。例えば、「明日の天気は？」と聞かれた時、以下のように答えることができる。

- (1) 雨だ / 晴れる
- (2) 雨だよ / 晴れるよ
- (3) 雨だね / 晴れるね

通常の会話では、(1)のような発話をするのはまれで、(2)の「よ」や(3)の「ね」のような表現をつけるのが普通である。これらの表現は文末詞<sup>(1)</sup>と呼ばれ、文の最後に付加されることによって様々な機能を表すことができる。

同様のことが日本各地の方言でも見られ、いわゆる「方言らしさ」を醸し出す。また共通語には見られないような、形式のわずかな違いとそれに応じた機能の区別を発達させていることがある。本稿ではその一例として、徳島方言で観察される文末詞のうち、推量を表す「ダロ」「ダー」と疑問、強調などを表す「デ」「デー」について、記述を行う。

\*1 室蘭工業大学 ひと文化系領域

## 2 徳島方言の地理的区画

徳島県は四国の東側に位置する県で、北に香川県、南に高知県、西に愛媛県と接している。その地理的位置から関西圏とのつながりが強く、その方言も全県的に近畿方言と共通している特徴を持つと言われるが、森(1982)の区分によると、上郡(かみごおり)、下郡(しもごおり)、うわて、海部(かいふ)、山分(さんぶん)の5区画<sup>(2)</sup>に分けられ、図1<sup>\*2</sup>のようになる。今回取り上げる方言は、下郡と呼ばれる地域の中でも北東側に当たる、鳴門市と北島町、藍住町、松茂町などで話されているものである。

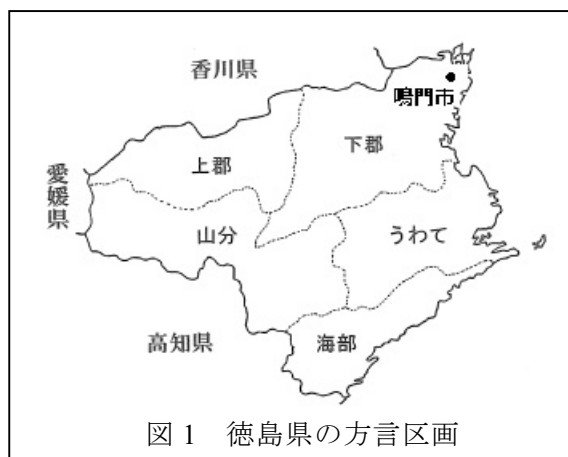


図1 徳島県の方言区画

### 3 徳島方言の文末詞「ダロ」「ダー」「デ」「デー」

#### 3.1. 文末詞「ダロ」

徳島方言には、断定辞「ジャ」の推量形または「推量」の文末表現として「ダロ(一)」<sup>(3)(4)(5)</sup>が存在する。頻度としては「ダロ(一)」が優勢だが、世代によっては元の断定辞「ジャ」の音形が残り、「ジャロ(一)」と発話されたり、時に近畿方言のように「ヤロ(一)」と発音されたりすることもある。上野(1997)から例を挙げる<sup>(3)</sup>。

- (4) ホラホーダロ／ジャロ／ヤロ (それはそうだろう)
- (5) イクダロ／ジャロ／ヤロ (行くだろう)
- (6) イッタダロー／ジャロー／ヤロー (行っただろう)
- (7) カカンダロ／ジャロ／ヤロ (書かないだろう)
- (8) カカンカッタダロ／ジャロ／ヤロ (書かなかっただろう)

#### 3.2. 文末詞「ダー」

上記の「ダロ(一)」に類似した表現に「ダー」という文末詞<sup>(3)</sup>がある。上記(4)-(8)は以下の(9)-(13)のように「ダー」を用いて言い換えられる。しかし、「ダロ(一)」が「ジャロ(一)」と言い換え可能な場合があるのと対照的に、「ダー」は「ジャー」を用いて言い換えることはできない<sup>\*3</sup>。

- (9) ホラホーダー / \*ホラホージャー<sup>\*4</sup> cf. ホラホージャロ
- (10) イクダー / \*イクジャー cf. イクジャロ
- (11) イッタダー / \*イッタジャー cf. イッタジャロ
- (12) カカンダー / \*カカンジャー cf. カカンジャロ
- (13) カカンカッタダー / \*カカンカッタジャー cf. カカンカッタジャロ

この言い換えができないことから、「ダー」は断定辞「ジャ」から独立して文末詞として分化しつつあると考えられる。

<sup>\*2</sup> 図1は上野(1997:2)<sup>(3)</sup>から引用し鳴門市の位置を加えたものである。図中の海部は灘とも呼ばれる。鳴門市、北島町、藍住町、松茂町の位置は付録を参照。

<sup>\*3</sup> 例の先頭に付されている「\*」は実際には現れない例であることを表す。

<sup>\*4</sup> 「ホラホージャー」という形式は「それはそうだ」の意味の時は実在するが、その場合は「ジャー」は断定を表し、推量は表さない。

加えて言い換え可能な「ダロ (一)」と「ダー」にも、音調<sup>\*5</sup>と機能に違いがある。「ダロ (一)」の音調は、(14)のように前の要素に続いて「LL (L)」として発話されて「推量」のみを表す場合と、(15)のように「LH」(「ダロー」の場合は「LLH」)として発話されて「推量+疑問」を表す場合とがある。一方「ダー」の場合は、(16)のように音調は常に「HL」になり「推量」と話し相手への「同意要求」を表す。

- (14) オナカガスイタラ、タベルダロ (おなかが空けば、食べるだろう) <推量>  
LLHLL
- (15) オナカガスイタラ、タベルダロ? (おなかが空けば、食べるだろう?) <推量+疑問>  
LLHLH
- (16) オナカガスイタラ、タベルダー (おなかが空けば、(きっと)食べるよね)  
LLLHL <推量+同意要求>

上記の(14)と(16)はどちらも「推量」を含んでいるが、(16)は話し相手の存在と同意が前提になっているので、独り言で使用できるのは(14)のみであり(16)は使用できない。同様の理由で、天気予報を伝えるときに用いられるのは「ダロ」のみである。

### 3.3. 文末詞「デ」と「デー」

文末詞「デ」と「デー」は徳島方言に特徴的であると言われている<sup>(6)</sup>。さらに先行研究でも、様々な意味、機能を表すとされている<sup>(3)(4)(7)(8)</sup>。例として鳴門市で採集された例を挙げる<sup>(9)</sup>。

- (17) ナンニツカウンデ? (何に使うのですか?)
- (18) モウジキクルデ (もうすぐ来ますよ)
- (19) サーツオツテクルデ。 (サーッと追って来るのよ。)
- (20) モノスゴイナンジェンニンモシンドンデ (ものすごく何千人もの [人々が] 死んでしまったのだ。)

裕口、岸江、仙波、久保、坂田(2017)によると、各例文の機能は、(17)は疑問、(18)は確信を持って意志を告げる、(19)と(20)は「～ではないか」という同意を求めるとされている。これら以外の機能としては、詰問、勧誘、強調<sup>(3)</sup>が挙げられ、さらに上昇や下降の音調が現れるとされている。また疑問を表す場合は丁寧な言い方になるという<sup>(4)</sup>。

このように文末詞「デ」と「デー」に関しては様々な機能と音調があるとされているので、以下では機能ごとにいくつかの例を挙げてみる。なお「デ」は「デー」とも発話されるが(例：ナンニツカウンデー?)、以下では「デ」で代表させることとする。

#### 3.3.1. 疑問の「デ」

まずは疑問を表す「デ」の例を挙げる。「デ」の付く要素のみを見るために状況を表す部分を括弧に入れて提示する。

	状況	例	音調	対応する意味
(21)	(探しているのは)	コレデ?	HHH	(これ?)
(22)	(吠えているのは)	イヌデ?	HLH	(イヌ?)
(23)	(痛いのは)	カタデ?	LLH	(肩?)
(24)	(当たると死ぬのは)	フグーデ?	LHLH	(フグ?)

\*5 本稿の音調の表記はカナ1文字に当たるモーラの高さの発音が高い場合は「H」、低い場合は「L」とする。また音節内の上昇「R」や下降「F」は、簡易的に「LH」と「HL」とし、長音として発音されていることを示す。

(25)	(お菓子)	イルデ?	HHH	(要る?)
(26)	(テレビ)	ミルデ?	LLH	(見る?)
(27)	(もう荷物は)	キタデ?	HLH	(来た?)
(28)	(捜し物は)	ナンデ?	LLH	(何かな?)
(29)	(うるさいのは)	ダレデ?	HHH	(誰かな?)

上記の(21)から(24)を見ると、疑問の「デ」は前にある要素の音調にかかわらず音調が常に「H」で現れている。また(24)の例からは、近年の徳島方言では基本的に実現しないといわれている<sup>9)</sup>、いわゆる拍内下降が「デ」の前で「フグー LHL」のように復活しているように見える。これらの例の中には、(25)や(26)のように勧誘と解釈できる例も含まれていることが分かる。

疑問の「デ」は、先行研究で「丁寧」と記述される<sup>4)</sup>ことが多いが、それは「デ」の代わりに、疑問の文末詞「カ」が使用されたときと比較すると、幾分語気が柔らかくことによると思われる。それはちょうど共通語で、「これ？」と「これか？」のペアのように、疑問の「カ」をつけたときとつけないときの語気、または「これかな？」や「これかい？」に対する「これか？」の語気の差に相当する\*6。この語気の緩和から勧誘の解釈も生じると考えることができる。

### 3.3.2. 推定判断の「デ」

次に(18)のような「確信を持って意志を告げる」とされている「デ」の例を見る。

	状況	例	音調	対応する意味	
(30)	(バスはもうすぐ)	クルデ	LLH	((心配しなくても) 来るよ。)	= (18)
(31)	(言われなくても自分で)	スルデ	HHH	(きっとするよ。)	
(32)	(そんな馬鹿なこと)	セーヘンデ	HLLLH	(きっとしないよ。)	

上記の(30)から(32)は動詞または助動詞に「デ」が付加されて、話者の推定判断を表す。この場合の「デ」は、前にある要素の音調にかかわらず「H」の音調を持つ。したがって3.3.1節の疑問を表す「デ」と同じ音調になるので、機能の区別は文脈に依存する。

### 3.3.3. 推定判断の強調の「デ」

3.2.2節の例文の音調だけが違う形式で、推定判断の強調を表し、話し相手への何らかの働きかけをすることができる。

	状況	例	音調	対応する意味
(33)	(バスはもうすぐ)	クルデ	LHL	(来るよ。急いで/安心して。)
(34)	(言われなくても自分で)	スルデ	HHL	(するよ。口出ししないで。)
(35)	(そんな馬鹿なこと)	セーヘンデ	HLLHL	(しないよ。口出ししないで。)

この機能を持つ「デ」は従来「詰問」と呼ばれていたものを含み、「L」の音調を持つ。したがって疑問の「デ」とははっきりと区別して発話することができる。

\*6 疑問の「カ」に関連する例として、通常話し相手に対する問いかけとして、疑問詞に「カ」のみをつけた形式は共通語では許容しにくい。例えば「お前誰だ」とは言えても「\*お前誰か」とは言えない。

- i. \*誰か? 誰だ? 誰? / 誰だい? / 誰かな? など  
 ii. \*ダレカ? ダレジャ? ダレ? / ダレデ? / ダレカイナ? など

その場合は(i)のように断定の「だ」を使う、「か」を使わない、または「だい」「かな」のような文末詞をつけた言い方になる。それに対応する徳島方言(ii)を見ると、「だ」に対応するのは「ジャ」であり、疑問辞を用いないのは共通である。さらに語気を緩和する文末表現に対応するもののひとつとして「デ」があることになる。

### 3.3.4. 確認要求の「デー」

「デー」には話し相手に対して確認を要求する機能を持つ用法がある。

	状況	例	音調	対応する意味
(36)	(早く行かないと)	ソンデー	HLLL HLHL	(損じゃないか)
(37)	(100点取るなんて)	ゴッツイデー	HLLLLL HLLLHL	(すごいじゃないか)
(38)	(欲しがっていたのは)	コレデー	HHHL	(これじゃないか)

確認要求の「デー」には(36)や(37)のように音調が2種類あり、「デー(HL)」と「デー(LL)」となるが、(38)のように「H」に後続する「デー」に「HL」の音調しかないことを考えると、基本は「デー(HL)」であり、それが弱まったものが「デー(LL)」となると考えられる。また「デー(HL)」と「デー(LL)」は基本的には長く発音されるが、常に長い「デー(HL)」と比較すると「デー(LL)」は短めに発音されることがある。

## 4 結語

本稿では徳島方言に見られる文末詞の「ダロ」「ダー」「デ」「デー」について主に機能と音調に関して記述を行った。その結果は以下ようになる。

	項目	機能	音調
(39)	ダロ (一)	推量	LL~LLL
(40)	ダロ (一) ?	推量+疑問	LH~LLH
(41)	ダー	推量+同意要求	HL
(42)	デ (一)	疑問	H
(43)	デ (一)	推定判断	H
(44)	デ (一)	推定判断の強調	L
(45)	デー	確認要求	HL~LL

「ダロ」と「ダー」に関しては機能と音調が1対1で対応しているのに対し、「デ」と「デー」に関しては、(42)の「疑問」と(43)の「推定判断」が同じ「H」であることと、同じ「推定判断」でも(43)と(44)のように「強調」が加わると音調が異なっていることが判明した。また(41)の「ダー」と(45)の「デー」は話し相手に対して「同意要求」や「確認要求」をする機能を有し、音調も「HL」を共通に持つことが観察された。この二つはちょうど「確認要求」を表す共通語の「だろう」と「じゃないか」<sup>(10)</sup>に対応するもので、今後は「確認要求」という談話機能を軸に対照研究を行うことも視野に入れて調査を行うことが重要である。

## 文献

- (1) 藤原与一 (1986)『方言文末詞<文末助詞>の研究 (上)』(昭和日本語方言の総合的研究第三巻) 春陽堂
- (2) 森重幸 (1982)「徳島県の方言」『講座方言学 11 中国四国地方の方言』国書刊行会
- (3) 上野和昭 (1997)「総論」平山輝男編著『徳島県のことば』p1-28, 明治書院
- (4) 川島信夫・金沢浩生 (1996)「北島町の方言」阿波学会紀要 42 (総合学術調査報告 北島町)  
<https://library.tokushima-ec.ed.jp/digital/webkiyou/42/4224.html> 2019年6月29日閲覧



- (5) 仙波光明 (2006) 「藍住町の方言」『阿波学会紀要』 52, p157-166.
- (6) 金沢治 (1961) 『阿波言葉の語法』 徳島市中央公民館付属図書館
- (7) 上野智子 (1984) 「阿波方言の文末詞デ(一)」『方言研究年報』 26, p41～59.
- (8) 村田真実 (2016) 「徳島方言における文末詞「デ」の音調と機能－徳島市及び近隣地域を中心に－」『音声言語』 VII p65-76.
- (9) 碓口有香子、岸江信介、仙波光明、久保博雅、坂田千春 (2017) 「鳴門市の方言」『阿波学会紀要』 61, p149-160.
- (10) 宮崎 和人 (1996) 「確認要求表現と談話構造--「～ダロウ」と「～ジャンイカ」の比較」『岡山大学文学部紀要』 25, p107-120.

付録：徳島県市町村地図による鳴門市、北島町、藍住町、松茂町の位置



フリー素材の「徳島県の地図 (Word/ワード) <https://www.digipot.net/?p=20909>」から作成

# 白金ナノ粒子を用いた電界効果トランジスタ型センサ の水素応答特性

福田 永<sup>\*1</sup>, 多田 芳広<sup>\*2</sup>

(原稿受付日 令和元年 7 月 1 日 論文受理日 令和 2 年 2 月 20 日)

## Response to Hydrogen in Field-effect Transistor Sensor with Platinum Nanoparticles

Hisashi FUKUDA and Yoshihiro TADA

(Received 1<sup>st</sup> July 2019, Accepted 20<sup>th</sup> February 2020)

### Abstract

A novel device based on nanometer size platinum (Pt) on the gate electrode of metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) for detecting hydrogen (H<sub>2</sub>) gas was fabricated. The operation characteristics of the device for the detection of H<sub>2</sub> gas presents as a function of H<sub>2</sub> gas concentration. The drain current in the output characteristics of the MOSFET increased rapidly depending on the H<sub>2</sub> gas concentration. It was possible to detect 1,000 ppm for H<sub>2</sub> gas at room temperature. A model was proposed to explain the operation. The sensing mechanism of the device is supported well by the experimental data.

Keywords : Gas sensor, Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET), Platinum particle.

---

### 1 はじめに

我々が日常生活を送るにあたり、ガスは必要不可欠なものとなっている。一般に使用されているガスには爆発性、有毒性を有し、わずかな漏れが人体を危険にさらすものも少なくない。また、ガスには、匂いなどの人の感覚器官ではその種類や濃度を察知できないものがある。そこで人の感覚器官に代わり正確にガスの種類や濃度を測定するガスセンサが必要となる(1)-(6)。人が感知できないガスの一つに水

\*1 室蘭工業大学 もの創造系領域

\*2 現 ディップソール株式会社研究技術開発本部電子材料事業部

素 ( $H_2$ ) が注目されている。水素の特徴として、以下の点がある。分子量が小さくガス密度が最小のため、最大の拡散性を持つ。爆発範囲が非常に広い(空气中で 4~75%) また、着火のエネルギーが極めて小さい(0.02mJ)。水素は、燃料電池などに使用され、また近い将来燃料電池は自動車とスマートハウスの主電源として位置づけられると考えられている。そのため、微量の水素を正確にかつ迅速に検知できるセンサが必要になる。本研究では、従来、主として北欧で活発に研究が進められている電界効果トランジスタ (Field-Effect Transistor ; FET) をベースとし、FET ゲート部に白金(Pt)ナノ粒子を塗布し感応膜とした新しいタイプのセンサを開発し、Pt 膜の水素吸着特性を FET の動作を通して評価した。具体的には水素暴露によるドレイン電流変化について調べた。FET センサの特徴としてゲート電極上の感応膜を選択することで、安定に種々のガスが検知可能であり、また感応膜が増幅器と直接接合しているため集積化が容易となる。またナノサイズの微粒子を用いたことにより、吸着量の増大と反応性の向上および室温での動作が可能となる MOSFET 型センサは最近ではバイオセンサとして進化している(7)-(8)。がん、感染症、精神・神経疾患など多くの疾患には、特定のタンパク質などの生体関連物質の存在が関与していることが知られている。そういった病気の原因となる物質や病気になると現れる物質 (バイオマーカー) の血液、尿、あるいは組織中の濃度を測定するバイオセンサの開発は、高度医療診断・臨床検査や健康管理・予防医療に役立つ計測機器の根幹として非常に大きな意味を持つ。東京大学では、高感度化に加え小型化や集積化にも利点を有する MOSFET を基幹デバイスとし、界面ナノ設計に基づく高性能なバイオセンサの提案と開発を行っている。

## 2 実験方法

チョクラルスキー成長により結晶成長した面方位 (100) のホウ素ドーピングシリコンウェハー (抵抗率 5 ~ 10 $\Omega \cdot \text{cm}$ ) を 1.5×1.5 cm 角にカットしたものを基板として用いた。試料は、RCA 洗浄により表面に付着した有機物および金属を除去した上でデバイスを作製した。はじめに、素子と素子とを電氣的に分離するフィールド酸化膜を 800 nm の厚さになるようウエット酸化法を用いて形成した。次に、フォトリソグラフィおよびエッチング技術を用いてフィールド酸化膜を一部開口し、リン(P)の熱拡散によりソースとドレイン領域 (チャンネル長 30  $\mu\text{m}$  になるよう設計) を形成した。次に、10 nm 厚のゲート酸化膜をドライ酸化法により形成した。ゲート電極形成は、アルミニウムを基板全面に蒸着し、レジストをマスクとしてソースおよびドレインのコンタクト部、およびゲートのパターンニングを同時に行った。その後、Pt ナノ粒子をゲート部に積層した。Pt 堆積に使用した溶液は、ナノ白金分散液 (株式会社ルネッサンス・エナジー・リサーチ製) であり、濃度が 10mM であり、平均粒子径は 1~6 nm である。溶媒は水とエタノールの混合液で、分散液は、PVP(ポリビニルピロリドン)である。これをパルスインジェクター装置を用いてインクジェットさせて噴射し、ゲート上に積層して電極パターンを形成した。このようにしてチャンネル長 30  $\mu\text{m}$ 、チャンネル幅 2.25  $\mu\text{m}$  の金属 - 酸化膜 - 半導体(Metal-Oxide-Semiconductor:MOS) FET 型水素センサを作製した(9)-(10)。センサの断面図を図 1 に示す。最初、高周波 C-V メーターを用いて MOS のキャパシタンスを測った。次にゲート電圧を固定し、ソース・ドレイン間電圧を変化させた際のドレイン電流を測定した。アクリル製の密閉容器にセンサを入れ、注射針を用いて  $H_2$  ガスをアクリル製デシケータ内に導入した。Pt を塗布した表面は、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて観察した。

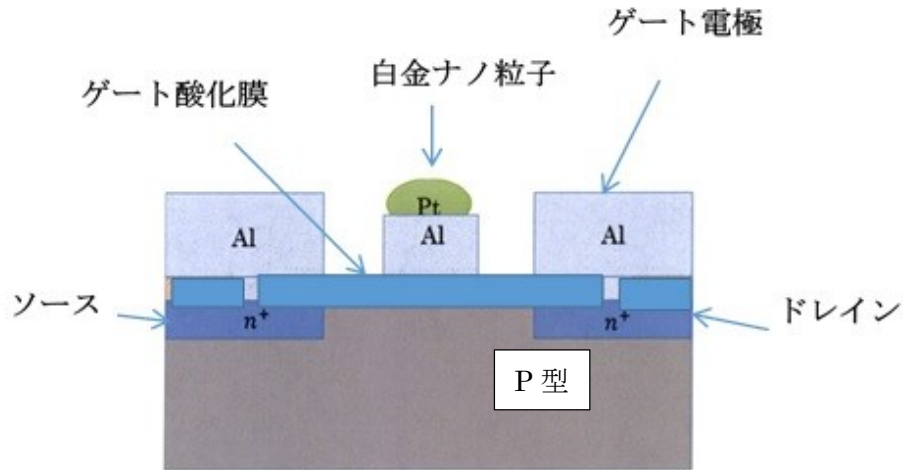


図1 MOSFET 水素センサの断面図

### 3 実験結果および考察

図2は、Alゲート電極上にインクジェット法により形成したPtナノ粒子表面のAFM画像を示したものである。図に示したように粒子が重なり合って薄膜を形成していることが確認された。表面粗さ( $R_a$ )は5.3nmであった。このように、実効的に表面積の大きな膜構造が得られた。

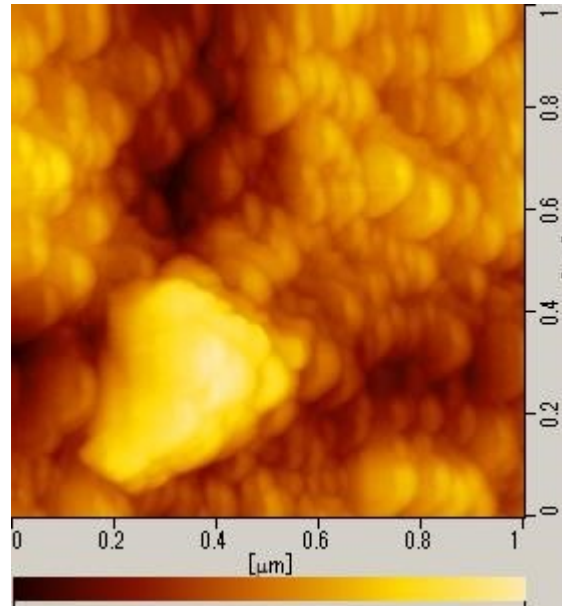


図2 AFMによる微粒子白金の表面形状

MOSFET型センサの動作特性を測る前に、MOSキャパシタでの容量 - 電圧 (C-V) 特性の水素濃度依存性について調べた。図3に示すように、水素濃度が1,000 ppmから40,000 ppmにかけて、C-V特性が平行にシフトしていることがわかる。この結果から、水素の爆発下限まで測定可能なことから漏れ検知用酸素ガスセンサとして動作可能なことが確認された。

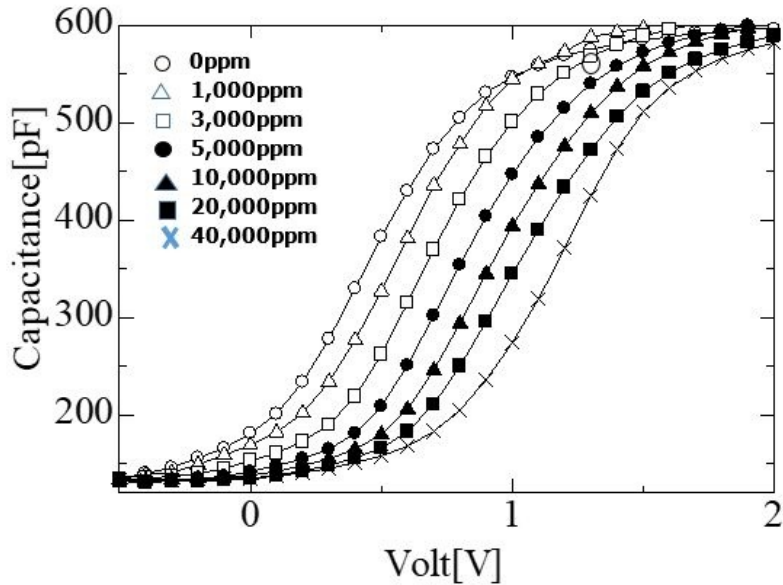


図3 MOS キャパシタの C-V 特性における水素濃度依存性

次に、作製した MOSFET 型センサの出力特性を図 4 に示す。測定は、室温 (27°C)、空气中、光の当たらない状態で行った。ゲート電圧が  $V_g=0\sim 3.0\text{ V}$  までの範囲で、1 V 刻みで、ソース・ドレイン間電圧 ( $V_{ds}$ ) を、0~5 V 変化させた際のドレイン電流 ( $I_d$ ) を測定した。 $V_g=0\text{ V}$  では電流がほとんど流れず、 $V_g$  が 0 V より大きい場合には、 $V_g$  の増加に伴い  $I_d$  が直線的に増加し、やがて電流値が飽和する傾向を示していることがわかる。このことから、エンハンスメント型 n チャネルの MOSFET として動作していることがわかる。また伝達特性からしきい値電圧 ( $V_{th}$ ) は、0.8 V であった。これより作製した MOSFET においてリーク電流が極めて微小であり、またドレイン電流が飽和することからセンサとして機能することがわかる。このことから、水素ガスの吸着による微小な電流変化を観察するために必要な条件を有していると判断した。

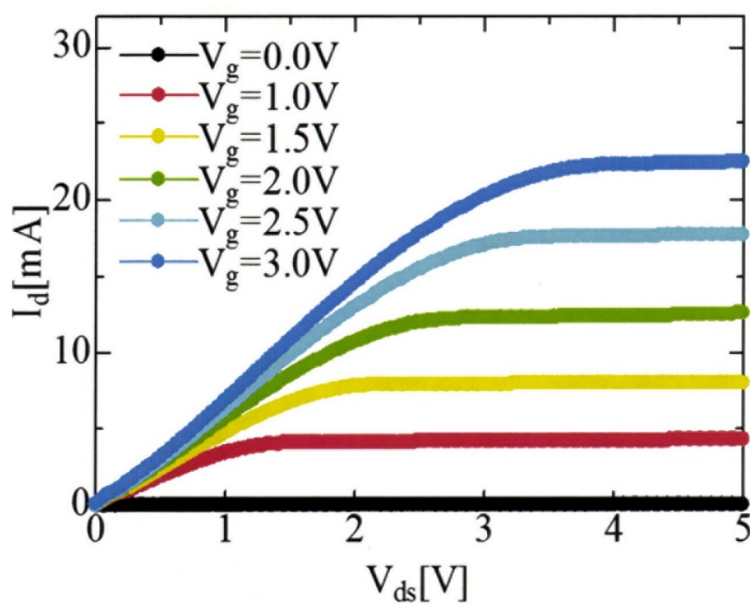


図4 MOSFET 型センサの出力特性

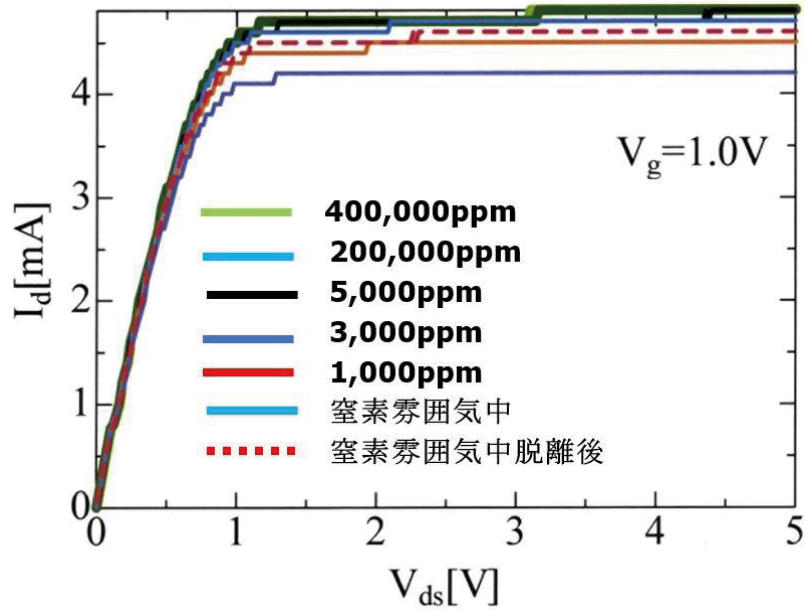


図5 MOSFET 型センサの出力特性における水素濃度依存性

水素導入後における出力特性の変化を図5に示す。水素導入量が増えるにつれて飽和領域の $I_d$ の増加が見られた。1,000ppmの濃度において感度が得られている。また、水素の導入量が5,000ppmを超えてから電流値の上昇が見られなくなったことから、5,000ppm付近で水素に対する反応が飽和したと考えられる。

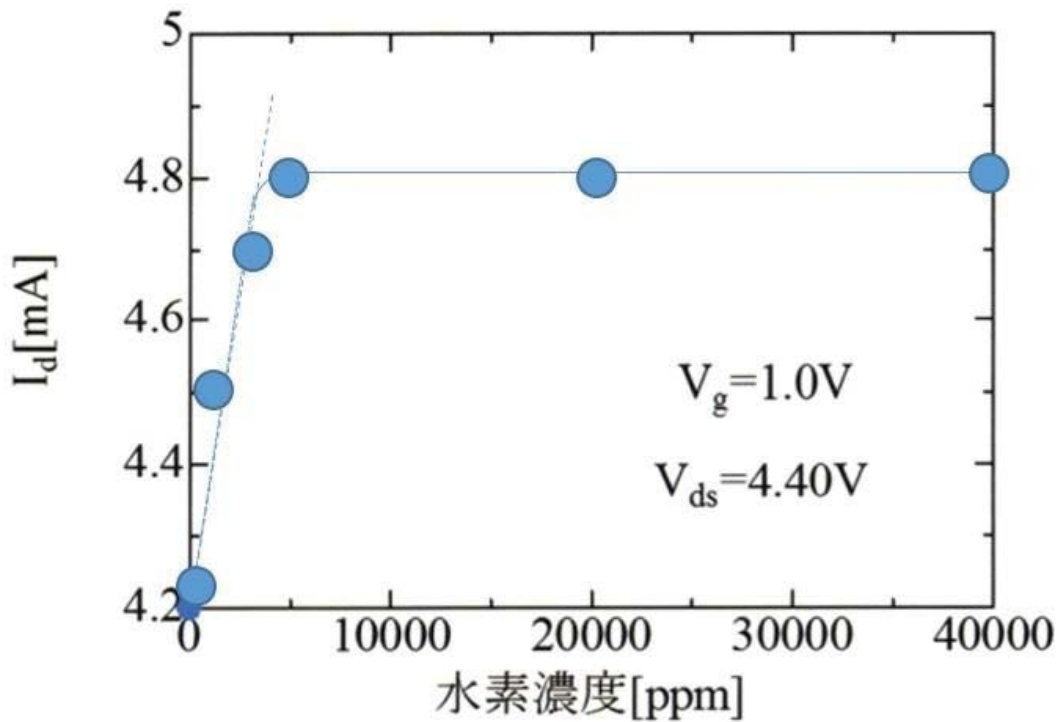


図6 飽和ドレイン電流の水素濃度依存性



図6より水素濃度が1,000ppmまでは $I_d$ が直線的に増加していることがわかる。しかし、5,000ppmを超えると $I_d$ が飽和する傾向を示している。水素濃度を水素分圧とみなし、吸着等温線と照らし合わせると、このように水素濃度とともに飽和する傾向があることから、吸着のタイプはラングミュア型であることがわかる。このタイプは、固体表面の単分子層で吸着が起こるものとして導かれており、化学吸着の場合に当てはまる型である(11)-(16)。ラングミュアの考え方は、一つの吸着サイトに一つの分子または原子が吸着し、そこが満席ならばそれ以上の吸着が起こらなく、吸着物質同士の相互作用はないという仮定に基づくものである。水素分子は表面の吸着サイトに吸着した後、原子状に解離し、その後Pt内部に拡散する。その後、水素原子は酸化膜/Pt界面に捕獲され電気双極子を形成する。そのことにより絶縁層（シリコン酸化膜）を通してチャネル領域の半導体表面に反転層ができ、キャリア（電子）が誘起され、それによってドレイン電流が増加するものと考えられる。一方、ゲート電圧 $V_g$ に $\Delta V$ が加わったことに対応する。 $\Delta V$ は水素の吸着量に比例し、水素濃度に依存する。今、吸着種が表面で解離して吸着する場合を考える。金属表面に水素が吸着する場合に対応することが知られている。ここで、吸着分子を $H_2$ 、吸着点を $\sigma$ として次に示す平衡状態を考える。



一つの吸着分子が解離吸着するには空いている吸着点が隣接していなければならない、隣接する2つの吸着点が空いている確率は吸着点での被覆率を $\theta$ とすると、 $(1-\theta)^2$ である。また、解離するためには、解離している2つの吸着種が隣接していなければならない。その確率は $\theta^2$ である。従って、吸着速度 $V_a$ は、 $P$ を水素の圧力とすると

$$v_a = k_a P (1-\theta)^2 \dots\dots\dots (2)$$

となる。また、脱離速度 $v_d$ は、 $v_d = k_d \theta^2$ である。ここで、 $k_a$ は吸着速度定数、 $k_d$ は脱離速度定数である。平衡状態では $v_a = v_d$ なので

$$\theta = (aP)^{1/2} / \{1 + (aP)^{1/2}\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $a = k_a/k_d$ は解離吸着平衡定数という。吸着量 $V$ は被覆率 $\theta$ に比例するので、 $V$ で(3)式を表すと次式が得られる。

$$V = S\theta = S(aP)^{1/2} / \{1 + (aP)^{1/2}\} \dots\dots\dots (4)$$

これがラングミュアの解離吸着等温式である。従って、吸着量の増加は、吸着表面積 $S$ を増加すればよく、これは感応膜表面を多孔質にするかもしくはナノ粒子表面にし、実効的に吸着表面積を増加するなどで実現できる。

#### 4 まとめと今後の方向

金属 - 酸化膜 - 半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)型の水素センサを作製し、室温でセンサの特性を調べた。ゲート部に感応膜として白金ナノ粒子を堆積させ、感応膜表面の実効的な面積を増加させることに成功した。その結果、室温で動作しかつ水素濃度が1,000ppm以下の感度をもつセンサが実現できた。MOSFET型ガスセンサの利点は、センサとなる感応部が増幅器であるFET部に直接接続しているため、集積化が容易であること、それに伴い小型・低コスト化が見込めることである。また感応膜を異なるものに置き換えれば種々のガスを選択的に検知することが可能である。今後の課題としては、セン

サ部に白金以外のナノ粒子、白金水和物などを感応膜とするセンサを作製し、これらの感応膜を持つガスセンサの特性の違いを調べる。

#### 文献

- (1) 新田雅夫, 武田義章, 原留美吉, ガスセンサとその応用, パワー社, 1971 年
- (2) 清山哲郎, 化学センサ, 共立出版, 1985 年
- (3) 近藤精一, 石川達雄, 阿部郁夫, 吸着の化学, 丸善, 1993 年
- (4) 桜庭一郎, 半導体デバイスの基礎, 森北出版, 2001 年, p101-121
- (5) I. Lundström, M. S. Shivaraman and L. Lundkvist, Applied Phys. Lett., 26, 1975, 55, 1975
- (6) I. Lundström, Sensors and Actuators, 7, 1985, 75
- (7) 逢坂哲彌, 黒岩繁樹, 秀島 翔, 中西卓也, “電界効果トランジスタを用いたマイクロセンサー-pH センサからバイオセンサまで”, Chemical Sensors, 28, 2012, pp.8.
- (8) S. Hideshima, S. Kuroiwa, M. Kimura, S. Cheng, T. Osaka, “Effect of the size of receptor in allergy detection using field effect transistor biosensor”, Electrochem. Acta, 110, 2013, pp.146.
- (9) 笠間滉一郎, 室蘭工業大大学院修士学位論文. 1999 年
- (10) 上西龍三, 室蘭工業大学大学院修士学位論文, 2001 年
- (11) 津山哲郎, 塩川二郎, 鈴木修一, 笛木和雄, 化学センサ～その基礎と応用～, 講談社, 1982 年, p13-73
- (12) 慶伊富長, 吸着, 共立出版, 1965 年, p1-48
- (13) 宮沢久雄, 物性物理学講座 10「界面物性・格子欠陥」, 共立出版, 1963 年
- (14) 末高 浩, 金属物性基礎講座 10「界面物性」, 丸善, 1976 年
- (15) 織田 孝, 江口良友, 吸着技術, 廣川書店, 1961 年
- (16) 山添 昴, センサと化学, 化学工業社, 1982 年

図 書 館 委 員 会

委員長	附 属 図 書 館 長	理 事	松 田 瑞 史
委 員	も の 創 造 系 領 域	准 教 授	真 境 名 達 哉 (紀 要 編 纂 部 会 委 員)
〃	し く み 情 報 系 領 域	教 授	鈴 木 幸 司 (紀 要 編 纂 部 会 部 会 長)
〃	ひ と 文 化 系 領 域	講 師	加 藤 正 和 (紀 要 編 纂 部 会 委 員)
〃	創 造 工 学 科	准 教 授	渡 邊 浩 太
〃	創 造 工 学 科	教 授	風 間 俊 治
〃	シ ス テ ム 理 化 学 科	准 教 授	山 中 真 也
〃	シ ス テ ム 理 化 学 科	教 授	平 井 伸 治
〃	理 工 学 基 礎 教 育 セ ン タ ー	教 授	松 本 ま す み
〃	総 務 広 報 課	課 長	及 川 晃 男
〃	総 務 広 報 課 図 書 学 術 情 報 室	室 長	中 村 陽 (紀 要 編 纂 部 会 委 員)

令和2年3月19日 印 刷 (非売品)  
令和2年3月19日 発 行

編 集 室 蘭 工 業 大 学  
発 行 行 〃  
〒050-8585 室蘭市水元町27-1

印 刷 株式会社 日 光 印 刷  
室 蘭 市 寿 町 2 丁 目 3 番 1 号  
TEL (0143) 47 - 8 3 0 8

表紙デザイン 目 黒 泰 道



