

地質工學

第13輯

Man darf nicht in dem Fehler sich
gefangen geben, dass man vor dem
Bäumen den Wald nicht sieht! –HEIM–

(立樹の前に立って森を見ざる誤り)

地質工学 再刊にあたって

会社設立 10 周年を迎えた昭和 27 年以来、事業の定期的里程標として、また地質工学の知識と経験の交換の場として刊行し、一時休刊しておりました「地質工学」を再刊する運びとなりました。

「阪神・淡路大震災」以来、「東日本大震災」、日本各地での火山噴火など、九世紀後から十世紀初頭にかけての「大地動乱」の相を帯びてきました。また、台風の大型化や線上豪雨など、地球温暖化の影響の顕在化も加わり、大規模な自然災害による国家的な損失が増加してきております。

私たちの業務は半世紀以上、新幹線・高速道路・原子力発電所などの国土インフラ整備の一端を担ってきましたが、今後は防災・減災のための任務に軸足が移ってきた感があり、「安心・安全」のための業務の効率化・高度化は喫緊の課題となっています。

土木、建築、地質、地震、環境などのジャンルは問わず、ふるって投稿をお願いするとともに、中堅技術者の研鑽の場として、また若手技術者育成の場として大いに活用していただき、小誌が国土強靱化のための調査手法や理論の進歩と発展に少しでも寄与できれば幸いです。

平成 27 年 12 月 7 日

日本物理探査株式会社

代表取締役 会長 加藤正男

代表取締役 社長 石田 定

地質工学 第13輯

目次

- 遠隔地に建立された関東大震災の慰霊碑
—名古屋市の日泰寺・照遠寺と長野市の善光寺における調査—
名古屋大学減災連携研究センター 教授 武村 雅之 …… 1
- 火山ガス 東京工業大学 名誉教授 平林 順一 ……16
- 屈折法地震探査の今昔物語 日本物理探鑛株式会社 社友 吉田 壽壽 ……23
- CB兵器の歴史的・技術的考察について
日本物理探鑛株式会社 技術顧問 草野 晋子 ……29
- 埋没鉄類探査を目的としたフラックスゲート磁力計システムの開発
日本物理探鑛株式会社 技術顧問 中塚 正 ……36
機械開発部 鶴川 英明
浦野 草平
高橋 正容
技術本部 吉田 武志
- 物理探査・地化学調査を用いた液状化・豪雨対策
日本物理探鑛株式会社 企画本部 内田 篤貴 ……45
関東支店 齊藤 弘昭
母良田正一
大島 雄太

富里市

遠隔地に建立された関東大震災の慰霊碑

- 名古屋市の日泰寺・照遠寺と長野市の善光寺における調査 -

武村 雅之¹⁾

1) 名古屋大学減災連携研究センター*

1. はじめに

日本の自然災害史上最大の被害をもたらした1923(大正12)年の関東大震災に対しては多くの慰霊碑や記念碑が残されており,近年それらの調査が進められている。武村(2012)は東京都23区内にある260件を調査し,また武村(2014)は横浜市内の119件の調査を行っている。さらに調査範囲を神奈川県全域に拡大し,2014年には神奈川県中部で125件,2015年には静岡県の熱海市・伊東市を含め神奈川県西部で170件の調査を完了している[武村・他(2014b,2015)]。調査は現在続行中で,横浜市を除く神奈川県東部が対象地域となっている。この他にも埼玉県さいたま市を対象に,石黒・他(2014,2015)が調査を行っている。

これらはいずれも被災地に建立されたり,残されたりした慰霊碑や記念碑などであるが,一方で被災地から離れた遠隔地においても慰霊堂が建設されたり,慰霊碑が建立されたりしていることが分ってきた。有名なものとしては,和歌山県の高野山金剛峰寺の霊牌堂があるが,その他のものについてはあまり知られていない。

高野山の霊牌堂は,震災当時に東京市長であった永田秀次郎が犠牲者の慰霊のために私財をなげうって奥之院に建立したもので,永田秀次郎による霊牌堂建立の願文とその経緯については,北原(2012)に詳しく述べられている。また近年,一万年保存を意図して制作され霊牌堂の中に保存されていたタイル製の「関東大震災犠死者名簿」の調査も行われている[坂口(2014)]。

しかしながら,この例は,被災地の中心にいた為政者の代表ともいうべき東京市長が,私的にとは言え,高野山という日本を代表する寺院に慰霊堂を建立したというもので,その意味では特別な例と言える。

北原(2011)によれば,震災で東京・横浜から地方へ避難した人の数は約100万人とも言われ,多くの犠牲者の遺族が地方に分散したこと,また肉親や知人を送り出し,その結果,震災でそれらを亡くした人々が地方に多くいたことなどを考え合わせると,地方から慰霊の声があがったとしても不思議ではない。

そのような観点から調査したところ,名古屋市の日泰寺・照遠寺と長野市の善光寺に慰霊堂や慰霊碑があることが分ってきた。そこで,まずは現地調査を実施した。本稿では,周辺の関連する石碑とともに調査結果を報告し,建立の経緯などについても議論する。

なお,名古屋市の結果については武村・他(2014a)ですでに報告済みのものを再構成したものである。

2. 日泰寺と善光寺

調査結果を示す前に,慰霊堂や慰霊碑がある名古屋市の日泰寺と長野市の善光寺についてその概要を紹介する。ともに特定の宗派に属さない,日本では稀な寺院である。

まず日泰寺は,名古屋市千種区にある大寺院で以下のような特異な歴史をもっている[日泰寺(2013)]。この起こりは,1898(明治31)年にイギリス人によってインドで釈迦の遺骨が発見されるという一大事件が起こったことである。発掘調査後インド政府はこの遺骨を仏教国であるシャム(現在のタイ)の王室に寄贈した。当時のシャム国王ラマ五世(チュラロンコン)は大変喜び,その一部を同じ仏教国のセイロン,ビルマに分与された。この時シャム国弁理公使稲垣満次郎は羨望に堪えず,国王に分与を懇願した。その結果「シャム国王から日本国民への賜物」として御真骨を下賜するという勅諭が得られた。

* 〒464-8601 名古屋市千種区不老町



図1 日泰寺周辺の地図．Aは供養堂，Bは追悼碑，Cは供養塔，Dは橘宗一の墓

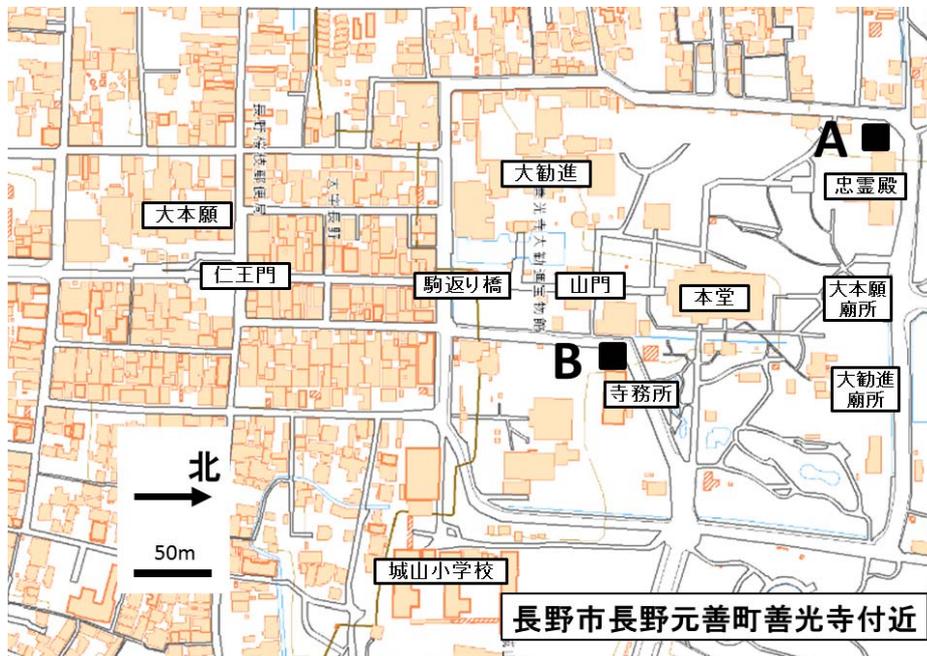


図2 善光寺周辺の地図．Aは関東震災横死塚，Bは善光寺地震の地震横死塚（地図はいずれも国土地理院による）

そこで直ちに当時の国内仏教 13 宗 56 派の管長が協議し、1890（明治 33）年に大谷光演（東本願寺法主）を正使として奉迎使節団をシャム国に派遣した。さらに国王ラーマ五世から御真骨を拝受する際に仏骨奉安の寺院を超宗派で建立すると約束した。それを聞いた国王は完成時のご本尊にとシャム国国宝の釈迦金銅仏一体を下賜された。この仏像は現在も日泰寺のご本尊となっている。

奉迎使節団の帰国後、御真骨を一旦京都の妙法院

に仮安置し、各宗派の代表が集まって仏骨奉安の寺院の建立について話し合ったが、候補地を巡って意見が分かれ容易に成案を得るに至らなかった。そんな中で名古屋市官民一致の誘致運動が最後に功を奏し、名古屋市への誘致が決まった。市民挙げての協力で現在地に十万坪の敷地が用意され、1894（明治 37）年に日本とシャム（暹羅）の友好を象徴する覚王山日暹寺（にっせんじ）が誕生した。日泰寺への変更は 1949 年（昭和 24）年のシャム国のタイ王国への改名に合わせて行われたものである。

図1は日泰寺周辺の地図である。境内は大きく山門・本堂・寺務所のある地域と御真骨を奉安した奉安塔のある地域に分かれ、その周辺に諸宗派の寺院や墓地が展開している。なお、現在は各宗派(19宗派が参加)の管長が三年交代で住職を務め、寺務も各宗の代表者が交代で携わっている。ただし本堂北側の僧堂は曹洞宗が管轄している。図1の黒四角で示すA,B,C,Dが関東大震災に関するものの位置で、それぞれ供養堂、追悼碑、供養塔と橘宗一の墓である。

日泰寺が高々100年余りの歴史の寺院であるのに対して、長野市の善光寺の歴史は古く、創建は仏教伝来からそれほど時を置かず西暦644(皇極3)年と伝えられている[善光寺事務局(2009)]。

一方で、全国でも稀な無宗派の寺院であることは日泰寺とよく似ている。笹本(2007)によれば、住職は「大勸進貫主」と「大本願上人」の両名が務めるという形を取っている。善光寺そのものには僧侶は住んでおらず、善光寺の行事や儀式などを維持し、宗教活動を行っているのは天台宗の「大勸進」という寺院と25院、浄土宗の「大本願」という寺院と14坊である。この点は各宗派の代表者が寺務を運営する日泰寺とどこか似たところがある。

図2は現在の善光寺境内の地図である。「大勸進」は山門の手前、駒返り橋の前から境内を囲む周回道路の内側、大本願は仁王門の外側にそれぞれある。「大勸進」は寺務を管理し、寄付行為を押しすすめる大本締めで、昔は本寺がなく、天台、真言の紆余曲折の末、1643(寛永20)年に東叡山寛永寺末となり1869(明治2)年以降は比叡山延暦寺に附属している。一方「大本願」は、蘇我馬子の娘、尊光上人開基と伝えられ、1199(正治元)年の法然上人参籠のみに、一山帰依して浄土宗となったという。善光寺の阿弥陀信仰という法燈を護る役割を担うのが「大本願」である。

「大勸進」の住職は「貫主」と呼ばれ、天台宗の名刹から推挙された僧侶が務めている。これに対し「大本願」は大寺院としては珍しい尼寺である。住職は「尼公上人」とも呼ばれ、門跡寺院ではないが代々公家出身者から住職を迎えている。現在の「大

本願上人」は鷹司家出身の121世鷹司誓玉上人である。

善光寺は、日本において仏教が諸宗派に分かれる以前からの寺院であることから、宗派の別なく宿願が可能な霊場と位置づけられてきた。また女人禁制であった旧来の仏教の中では稀な女性の救済が掲げられているのも、「大本願」の存在があるからであろう。なお、「大本願上人」の菩提寺は、善光寺の南南西約500mにある浄土宗の西方寺である。西方寺は善光寺が火災にあった時に仮本堂としてご本尊を護った歴史がある。また、代々の「大本願上人」と「大勸進貫主」の御廟所は本堂の後ろにあるが、真後ろが「大本願上人」、少し東へずれた位置に「大勸進貫主」の御廟所がある。このことも法燈を護る中心が「大本願」であることを表しているようである。

図2の黒四角で示すAが関東震災横死塚、Bは1847(弘化4)年の善光寺地震の地震横死塚である。



図3 日泰寺の関東大震災供養堂



図4 供養堂の前にある由来碑

3. 名古屋市の日泰寺・照遠寺の調査結果

名古屋市千種区法王町1丁目1番地の日泰寺と名古屋市東区東桜2丁目16番地21の日蓮宗照遠寺について調査した。日泰寺の調査は、2012年12月9日、2013年2月1日、2013年3月12日の3回行い、1回目と2回目は筆者が単独で、3回目は北原系子氏はじめ当時の国立歴史民俗博物館のグループと合同で行った。さらに2014年3月2日には筆者単独で追加調査も行っている。また照遠寺については2013年11月28日に筆者が調査を行った。

日泰寺は地下鉄東山線覚王山駅の北約600mにある。また照遠寺は地下鉄東山線新栄駅北西約300mで、いわゆる東寺町にある。まずは、日泰寺にある供養堂と2つの慰霊碑ならびに橋宗一の墓の調査結果から順次説明する。

3.1 関東大震災供養堂

図1を見ると、本堂の北東に御釋迦様の御真骨を奉る奉安塔があり、その入り口右側(A地点)に小さな御堂がある(図3)。この御堂が関東大震災の犠牲者を奉る供養堂である。前に建つ由来碑(図4)を読むとそのことが分かる。由来碑の記載を以下に示す。

(1) 供養堂の由来碑

(正面)

関東大震災惨死者遺骨

供養堂由来記(以上題額)

噫 大正十二年九月一日午前十一時五十八分突如として起った大震災は一瞬にして関東の地を鬼哭啾々の焦土と化した殊に最も凄愴を極めたのは幾萬の生霊が叫喚の中に焼死したあの本所區被服廠跡でその悲惨な状態は全く活地獄さながらの光景でありました此の時當日暹寺では各講員を動員して毎日名驛頭に派し流浪せる避難民を收容宿泊せしめ救済に務めたり 一方丹羽一道横地全映木村彌作堀榮七松尾順弘の諸氏及び不肖の六名を慰問使として現地に特派し東京横濱を中心に親しく数十の火葬場を弔問し多数の遺骨を拾集して歸山いたしました

爾來その遺骨は特に供養の為め鑄造された釋尊の銅像と共に日暹寺の本堂に安置されておりましたが本年恰も本會の創立二十週年に當り記念事業として日暹寺から之れを懇請することを得ましたので茲に供養堂を建立し永く遺霊の冥福をお祈りする事となつたのであります

萬燈會創立二十週年紀念事業と

関東大震災惨死者遺骨供養堂の建立

皆さま、お忘れではないでせう。大正十二年九月一日午前十一時五十八分突如として起る大音響と共に大震動起り一瞬にして関東地方を焼野原と化しました。子は親を、親は子を叫ぶ、あの悲惨なる現実は、まったく此の世ながらの活地獄でありました。本所被服廠跡の三萬有餘の悲惨なる焼死の跡、また岡田川も死屍累々として水色を變するなど関東平野一帯の、其の惨害の大なるに當時の全國民はたゞ驚愕してしまいました。此時覺王山日暹寺に於ては各講員を總動員して、避難民を驛頭に迎へて收容一泊せしめ、懇ろに慰め申したのであります。又慘害地方に信徒代表者六名を派遣し東京、横濱、數十ヶ所の惨死者火葬場を廻り死者に回向し多数の遺骨を拾集して歸山したのであります。爾來其の供養の爲め鑄造したる釋尊銅像と共にその遺骨は日暹寺本堂に安置して今日に至つたのであります。過去十八年前を回想すれば萬感胸に迫るものがあります。茲に於て不肖私共當時の上京代表の一員でありますので今日日暹寺の許可を得ましたので本會紀念事業として関東大震災火災惨死者遺骨供養堂と奉仕者詰所を同時に建設する事となりました。そして永久に関東大震災火災惨死者の靈の追善供養いたしたいと存じます。以上の主旨を賛せられて本事業の完成に一段と御支援あらん事を乞ふ次第であります

昭和十五年一月

覺王山萬燈會

小林 藤 吉 謹白

會 則

- 一、本會は関東大震災惨死者遺骨供養堂並に奉仕者詰所を建立して関東大震災惨死者の靈並に會員祖先の尊靈を祀り三界萬靈の供養をなすを目的とす
 - 一、本會は會員組織にして會費金拾貳圓也一口一靈(位牌に法名を彫刻して)として一人數口の申込を得
 - 一、本會は會員三百五十口を以て募集限度とす
 - 一、申込の切期限は豫定數に達したる時はを切るとす
 - 一、入佛式は本年四月の豫定にして當日は會員を御招待申し上げます(目下工事中)
 - 一、毎月二十一日全遺骨と會員各位の祖先の尊靈に回向し家内安全の祈禱を行ふ
 - 一、建立地は覺王山釋尊奉安塔前萬燈供養塔のすぐ横に建立す
- 但し特別寄附は此限にあらず

供養堂及奉仕者詰所建設收支豫算書

収入之部

一金四千二百圓也 會員三百五十口募集
 一金三千八百圓也 萬燈會より支出

使用用途之部

一金八千圓也 供養堂及奉仕者詰所建設費其他

合計金八千圓也

右之通り

決算報告は入佛式當日致します

図5 日泰寺に残る萬燈會による供養堂建立の趣意書

覺王山萬燈會 小林藤吉

謹で白す

(裏面)

覺王山萬燈會役員

(1 段目)

會長 小林藤吉

理事 高橋重太郎

全 吉田富三郎

幹事 杉江榮三郎(など5名)

(2 段目)

幹事 松尾奈良松(など5名)

昭和十五年四月

石寄附者 / 中區古渡町 / 堀まさ

由来碑にあるように供養堂の建設は奉仕者詰所の建設も含めて「萬燈會創立二十周年紀念事業」として行われた。慰問使の一人で当時日暹寺の執事であった丹羽一道からの願いでもあったようである。

萬燈會會長小林藤吉が昭和 15 年 1 月付で出した趣意書が残っている(図 5)。それによれば、建設資金とすべく、寄附金は会費として 12 円を一口とし、一口一霊で位牌に法名を彫刻するとある。一人で数口申し込むことができ 350 口に達し次第締め切るとある。また入仏式の予定を同年 4 月とし、その際に会員を招待すること、その後は毎月 21 日に震災犠牲者の遺骨と位牌に刻まれた会員各位の祖先の霊を回向すると書かれている。毎月 21 日は弘法大師の月命日にあたり日泰寺の縁日である。いまでも御堂の扉を開け毎年震災の日の 9 月 1 日には供養が行われている。趣意書の最後に建設地は奉安塔前萬燈供養塔のすぐ横であると書かれている。

(2) 供養堂の内部

供養堂の内部は正面に由来碑にある釈迦の立像が祀られ、その後ろに寄附金に応じて祖先の法名を刻んだ位牌が並んでいる(図 6, 7)。また祭壇の左側には、震災後慰問使として派遣され遺骨を収集して



図 6 犠牲者の供養に建立された釈迦像



図 7 釈迦像の後ろに祀られた寄附者の位牌



図 8 震災直後に派遣された慰問使 6 名の写真



図 9 供養堂の入仏式の際の様子と寄附者の集合写真

きた 6 名の写真(図 8), 右側には供養堂建設の寄附に応じた奉仕者の入仏式における集合写真など(図 9)が掲げられている。

また左側の壁には, 震災の 2 年前の 1921 (大正 10) 年 10 月の萬燈會創立の様子を伝える資料が掲げられている。供養堂を建設した萬燈會とは如何なる目的をもった組織であったのだろうか。

(3) 萬燈會

供養堂のすぐ横には「覺王山萬燈會萬靈供養紀念塔」という塔が建っている。趣意書の最後に書かれている萬燈供養塔である。1921 (大正 10) 年 10 月の萬燈會の創立ならびに事業達成の記念に建てられたもので, 会長の小林藤吉はじめ理事 3 名, 幹事 7 名の名前が刻まれ, 由来碑に書かれている理事の高橋重太郎や吉田富三郎も理事として名を連ねている。紀念塔正面のプレートには供養堂内にある萬燈會創立の資料とほぼ同じ内容のことが刻まれている。

それらを要約すると, 釈尊の遺骨を奉安する覺王山日暹寺は, 創立以来境内の内外に各宗寺院が移転し, 弘法大師を祀る八十八ヶ所も整備され, 参詣の人も年々増加し日々数千また万に達するようになった。これに応じて電車は門頭まで通じ道路もすこぶる改善されたが, 惜しむべきは境内に燈火の設備が不十分で, 夜間の参詣者に不自由を与えていることであった。大正 10 年ころ日暹寺以東は電燈の設備がなく, 人家や寺はランプを使用する状況であった。そこで小林藤吉が発起人となって, 1 万 5 千有余名の賛同者を得て萬燈會を組織して, 山内に電燈を施すようにした。その事業達成を記念して釈尊宝塔の下に建てられたのが先の「覺王山萬燈會萬靈供養紀念塔」である。

このように萬燈會は日暹寺を愛し, 山内に電燈の普及を図るために創設された一般信徒の組織である。

3.2 関東大震災横死者追悼之碑

奉安塔の裏の千種区月ヶ丘一丁目にあたる住宅地に面した一角に, 一丁目の慰霊碑がある(図 1 の B)。八十八ヶ所巡りの札所に見立てた祠が集まっている場所で, 敷地の中に多くの石碑が建ち, そのうちの最も西の外れにあるのが関東大震災の慰霊碑である。図 10 に正面, 図 11 に背面の写真を示す。碑文は以下のとおりである。

(正面)
 関東大震災横死者追悼之碑
 永阪周題

(背面)
 大正十二年十二月十二日建
 名古屋市東区蒲焼町青年會
 世話人町役員一同



図 10 日泰寺にある関東大震災横死者追悼之碑



図 11 碑の背面。東区蒲焼町の文字が見える。

災は災と同じである。建立の日は地震が発生した9月1日から数えるとほぼ100日目にあたり、百力日法要に合わせて建てられたものと思われる。

背面には東区蒲焼町の文字が見える。蒲焼町は現在の中区錦三丁目にあたり、地元青年会が主体となって建てられた慰霊碑のようである。次に説明する「関東大震災惨死者供養塔」との関連性についてはよく分からないが、同碑の世話人や寄附者の出身町に東区蒲焼町は含まれておらず、両者は独立に建立されたものと見られる。

石碑は1988(昭和63)年4月下旬に現在地に整備された。そのことを伝える同年6月6日の朝日新聞によれば、石碑は元々隣接する千種区南ヶ丘二丁目の路傍に半ば埋まって倒れていた。それを知った当時の日本福祉大学講師であった小出裕氏と錦三丁目の住民が、日泰寺に働きかけて現在地に再建立したものである。碑は1959(昭和34)年の伊勢湾台風の時に倒れ、以来そのままになっていたということで、その時点ですでに建立の由来は分からなくなっていた。

表題の揮毫者である永阪周は本名永坂周二、号を石塚(せきたい)という名古屋出身の漢詩人・書家である。医師の家系で医師を業として東京で活躍したが、晩年名古屋に戻ってもっぱら文墨に親しんだ。1924(大正13)年に80歳で没しており、その直前にこの碑の表題を表したことになる。

この他にも、同じ敷地にある大正12年4月建立の「岡本多喜子壽碑」と題する碑の書や大正6年4月建立の箏曲の「小松檢校頌徳碑」の撰文並びに書も永阪周によるものである。また大正8年に亡くなった消防組の「鷲頭 森鍬次郎碑」と題する墓地内の石碑の表題も永阪周であることを見つけた。晩年多くの石碑の書や撰文を手掛けた人物であることが分かった。

3.3 関東大震災惨死者供養塔

もう一つの慰霊碑は、地下鉄自由が丘駅のすぐ近く、日泰寺墓地内の名古屋商業高校に隣接するところ(図1のC地点)にある。高さ3mにもなる大きなものである(図12)。刻まれている事項は以下のとおりである。

(正面)

大正十二年九月一日

関東大震災惨死者供養塔

(左側面)

大正十五年八月廿一日建之

(裏面)

世話人

(1段目)

中区裏門前町一丁目 永田茂次郎

全 西日置町出先 水野金次郎

西区花車町 浅井鉄工所

中区裏門前町一丁目 永田安次郎

東区筒井町 山内鐵工場

南区熱田田中町 高田為次郎

イセ 桑名 近藤榮吉

中区西川端町三丁目 榮田尊吉

(2段目)

中区米野町 牛田丑次郎

発起人 青山金次郎

岡崎市 石匠 宇野真太郎

(右側面)

寄附者

(3段に渡り8名ずつ計24名の住所・氏名を記載)

世話人の住所を現在の住所と対応させると、中区裏門前町一丁目は現在の上前津1-2丁目、門前町・橋1-2丁目、中区西日置町出先は現在中川区、西区花車町は現在中村区名駅1-5丁目、東区筒井町は現

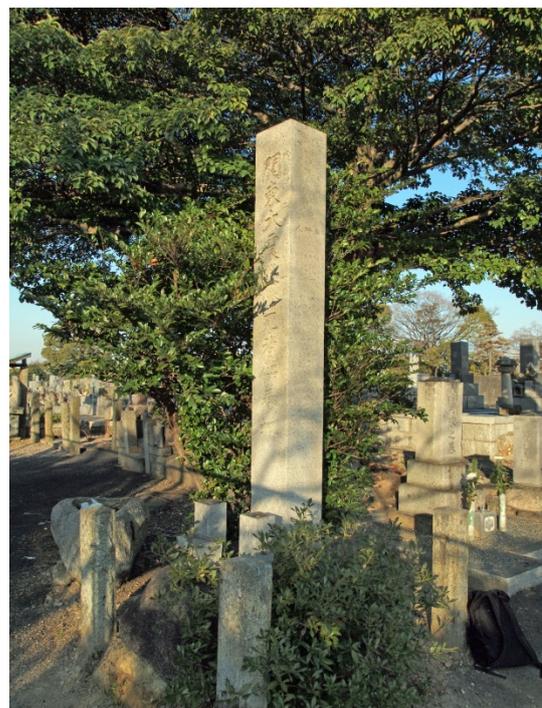


図12 日泰寺の関東大震災惨死者供養塔

在も変わらず、南区熱田田中町は現在熱田区田中町、中区西川端町三丁目は金山 1-5 丁目、中区米野町は現在中村区に属している。桑名の 1 名を除きいずれも名古屋市内のかなり広い範囲の人が世話人となっている。寄附者についても横浜市磯子町の一人を除いて、いずれも当時の名古屋市の中区、西区、東区の人々である。

寄附者の出身町を全て列挙すると、中区丸太町五丁目、正木町六区、松島町、裏門前町三丁目、元田町五丁目、西須崎町、西日置町出先、大池町一丁目、東区水筒先町、車道東町、水筒先町、筒井町、西区小田原町一丁目、花車町、児玉町、中区裏門前町一丁目、松元町、横浜市磯子町、中区門前町四丁目、西川端町五丁目、裏門前町二丁目、西日置町出先である。

先に紹介した追悼碑やこの供養塔の由来について、本堂横の寺務所で伺ったか、資料もなく碑文の情報以外には分らないとのことであった。供養堂の由来碑にもあったように名古屋駅の駅頭などで避難民の救護に当たった人々による建立であろうか。

3.4 橘宗一の墓

日泰寺には、この他に関東大震災の混乱の中で非道な大人によって殺された罪もない少年の死を悼む墓碑がある。いわゆる甘粕事件の犠牲者である。

(1) 甘粕事件と橘宗一

被害者の橘宗一（むねかず）は、1917（大正 6）年にアメリカ移民で貿易商の橘惣三郎とアナーキストとして有名な大杉栄の妹あやめとの間に長男として生まれた。

宗一は関東大震災の際にたまたま母と共に日本に帰国していた。事件の日の 9 月 16 日は鶴見の叔父勇一（大杉栄の弟）のところにいた。そこへ震災で消息が分からなくなった弟と宗一の消息を訪ねて大杉栄と伊藤野枝夫妻が訪れた。大杉らは勇一家の無事を確認し、ここは不自由だからと宗一を連れて自宅に戻ることにした。当時大杉は豊多摩郡淀橋町柏木（現在の新宿区柏木）にあって大した被害もなかったのである。ところが 3 人が大杉の自宅近くまで戻ったところを憲兵隊の甘粕大尉らに連行され殺害された。いわゆる甘粕事件である。大杉と伊藤が惨殺され当時満 6 歳の宗一は口封じのために殺されたのである。

随筆家の内田魯庵は大杉と親しく直前の大杉夫妻の日常を「最後の杉」という一文に残している[内田魯庵(1994)]。大杉は震災後原稿書きもままならないので、運動がてら日に何度となく子供を乳母車に乗せて近所を歩きまわり、晩は夜警にもでていたという。野枝とともにごく普通の家庭生活を送っていたのである。また誰かが「革命というのはこんなときにやるんじゃないか」と言ったところ、「どさくさまぎれにどたどたやるのが革命じゃないんだ。多くの人が右往左往しているときに変なことをしてな

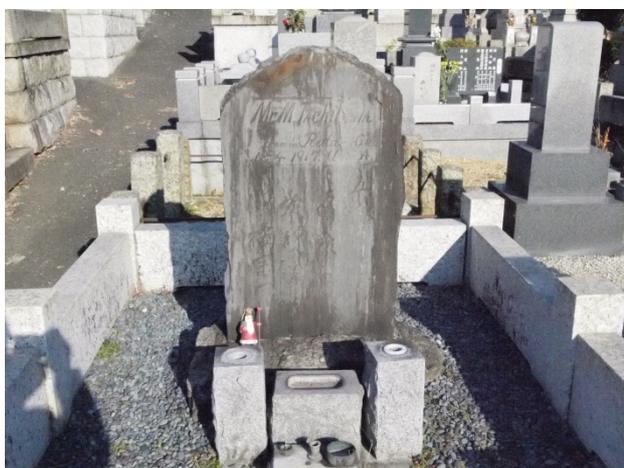


図 13 日泰寺にある橘宗一の墓

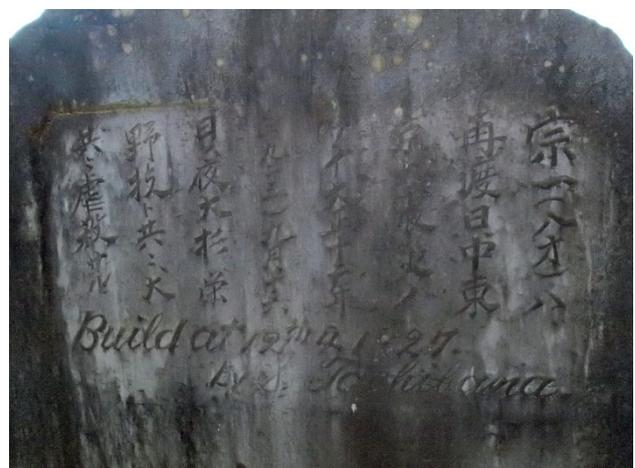


図 14 事件のいきさつが書かれた墓碑の裏面上部

お困らせてはいけないんだ。」と答えたという[橋宗一少年の墓碑保存会(1985)].

墓碑は父親の橋惣三郎が、宗一が満10歳になるはずの年に建立したものである。墓碑の正面を図13、背面上部を図14に示す。

(2) 墓碑の記載

(正面)

Mr. M.Tachibana / Born in Portland Org. / 12th
4.1917.USA (題額)

吾人は
須らく愛に生べし
愛は神なればなり

橋 宗一

(背面)

宗一(八才)八

再渡日中東

京大震災ノ

サイ大正十二年

(一九二三年)九月十六

日ノ夜大杉栄

野枝ト共ニ犬

共ニ虐殺サル

Build at 12th 4.1927 by S.Tachibana

(以上上部)

なでし子を

夜半(よわ)の嵐に

た折られて

あやめもわかぬ

ものとなりけり

橋 惣三郎

(以上下部)

この歌の「なでし子」は、花の「なでしこ」と「愛する子」との掛詞。「あやめもわかぬ」は、「はつきりと分らない」それほどの酷い状態だったということと、宗一の母の名前「あやめ」との掛詞である。

最愛の我が子を理不尽にも失った無念さが碑文からにじみ出ている、前に立つと誰しも胸がつまる墓碑である。なお碑文では亡くなった時の宗一の歳を8歳と記しているが、正しくは満6歳と5か月で数え年でも7歳である。父親が最愛の子の歳を間違えるとも思えないが、時が流れても心の動揺は隠せぬものだったのだろうか 図15は宗一の写真である。

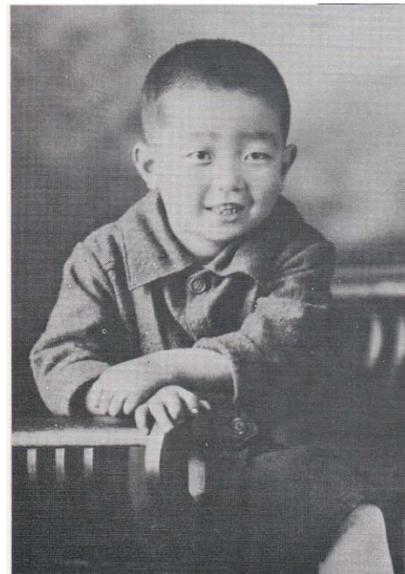


図15 橋宗一(満4歳)の写真
[橋宗一少年の墓碑保存会(1985)]

(3) 建立後の墓碑

墓碑は宗一惨殺の4年後に建立されたがその後の時代背景もあり、人知れず草むらに放置されていた。日泰寺に近い団地にお住まいだった西本令子さんがたまたま自宅近くを犬と散歩している途中で見つけ、朝日新聞の「ひととき」欄に投書し、1972(昭和47)年9月13日に掲載されたのが再び世に知られるようになったきっかけだった[橋宗一少年の墓碑保存会(1985)].

それを読んだ当時婦選会館で活動していた児玉勝子や社会主義運動の開拓者として有名な堺利彦の一人娘の近藤真柄をはじめ、大杉に縁の人や名古屋で人権問題に係わっている人、さらには愛知県出身の市川房枝や婦選会館の人々など多くが協力して「橋宗一少年墓碑保存会」が設立され、日泰寺内に墓地が整備された。その結果、1975(昭和50)年9月15日に初の墓前祭がおこなわれ、現在でも毎年保存会によって墓前祭が続けられている。

3.5 照遠寺の慰霊碑

日泰寺以外にも、名古屋市内に関東大震災の慰霊碑のある寺がある。日蓮宗照遠寺である。

照遠寺は1610(慶長15)年の清州越しで名古屋に移った寺で、名古屋城下を防備するための西南、東に建設された寺町のうち東寺町の寺院の一つである。東寺町はほぼ南北に禅寺町筋と法華寺町筋が伸び、法華寺町筋の西側に位置する比較的寺域が広め

の寺の一つが照遠寺であった。

尾張七代藩主徳川宗春に葵の御紋を許されるなど尾張藩の庇護を受けた。1853（嘉永6）年の火災後再建，さらには1891（明治24）年10月28日の濃尾地震で鐘楼大破などの被害を受けたが修繕され，関東大震災の時でも正面に祖師堂を仰ぐ大きな寺であった。現住職（30世）の話では，幸い第二次世界大戦の空襲は免れたが，1959（昭和34）年の伊勢湾台風で祖師堂などが倒壊し，再建のために敷地の一部を売却して祖師堂跡に現在の本堂が再建されたという。

現在は山門（図16）を入ると正面に本堂があり，その左側に2つの小さな震災の慰霊碑が建っている（図17）。左側が関東大震災，右側は濃尾震災の慰霊碑である。

(1) 関東大震災の慰霊碑

（正面） 関東大震災横死者之霊

（背面） 當山嗣法日極代

（右側面）

大正十二年九月一日於関東千古未曾有ノ大震災起リ横死者実二十有余万ニ及ブ其惨状極マレリ此ノ精 霊ヲ永ク為吊聊カナル碑ヲ茲ニ建立ス

供養主 町内

役員 / 青年團 / 各寺院

霊は霊，吊は弔と同じ。「精霊を永く弔うためいささかなる碑を茲に建立する」という意味であろう。供養碑の由来など住職にお伺いしたが詳細は不明である。日極は先々代のごことで28世である。

(2) 濃尾震災の慰霊碑

（正面） 震災死亡靈魂紀念碑

（背面） 明治廿四年十一月十五日 小

建立者とみられる5文字（ ）は背後の隙間が狭く完全には読めない。関東大震災の慰霊碑には供養主として，町内の役員と青年団，さらには各寺院と書かれており，少なくとも東寺町の寺院がこぞって建立に協力したものと思われる。後で述べるように，関東大震災直後の避難民の受け入れに寺院が大いに協力したという資料があり，そのことからして，東寺町にもかなりの避難民が来たことが想像され，それらの人々への同情が慰霊碑建立のきっかけになったのかもしれない。



図16 照遠寺の山門



図17 関東大震災（左）と濃尾震災（右）の慰霊

4. 長野市善光寺の調査結果

長野市長野元善町491番地の善光寺について調査した。調査は2015年7月23日，24日に行った。

善光寺はJR長野駅から中央通りに沿って北へ約2km余り行ったところにある。図2にあるように関東震災横死塚（A）は境内の北西隅の忠霊殿の横にある。また1847（弘化4）年の善光寺地震の地震横死塚（B）が寺務所の横にあるので，比較のためにこちらも調査した。またBの位置にはやはり善光寺地震に関連して「一字一石供養塔」という石塔も建っている。

4.1 関東大震災横死塚

塚は宝篋印塔として建立されている（図18）。小林（1977）によれば，宝篋印塔の総高さは400cmで台座巾は215cmである。碑文は以下のように刻まれている。

(台座正面)
 関東震災横死塚
 (台座背面)
 大正十二年 / 九月一日
 関東大 / 震災横 / 死者 / 分骨
 大正十五年 / 六月
 善光寺 / 建之
 (下台座背面)
 上水内郡 / 若槻村 / 字吉村
 石工 / 田中市太郎

塔身部の四面には、金剛界四仏である阿闍・宝生・阿弥陀・不空成就の4如来を表す梵字による種字が書かれている。横死塚は、1926(大正15)年6月に犠牲者の分骨を納めて善光寺によって建立されたことが分かる。なお、上水内郡若槻村字吉村は石工の出身地である。若槻村は当時の長野市の北に隣接する村で、現在は長野市の一部となっている。

参考のために記載すると、震災前後の「大勸進」の貫主は93世大僧正晃純(在位:明治41年10月27日 - 大正13年3月1日)と94世大僧正寂暁(大正13年3月1日 - 昭和17年5月)である。また「大本願」の尼公上人は第119世大宮智栄(大正元年10月29日 - 昭和36年10月6日)であった。本堂裏手の御廟所の墓碑でいずれも確認できる。大宮智栄上人は大宮以季子爵の息女である。

4.2 善光寺地震横死塚

小林(1977)によれば、宝篋印塔の総高さは410cmで関東震災横死塚とほぼ同じである(図19)。近年、



図18 善光寺にある関東震災横死塚

前に建った「地震塚」の石碑によれば、1996(平成9)年に善光寺地震150周年忌供養の際に改葬されたと書かれている。横死塚に刻まれた碑文は以下の通りである。

(台座正面)
 地震横死塚
 (台座左面)
 世話人
 當國上田真田村 / 白山寺義門
 同上田横町 / 宗吽寺覺賢
 當所 / 山崎文冲
 當國上田房山村 / 橋詰三平
 (台座背面)
 世話方
 當所長野町 / 久五郎
 石工 / 吉左衛門 / 鳶頭 / 常八
 弘化四年歳次丁未三月廿四日
 (台座右面)
 發願主 / 當國上田住 / 土屋仁輔 / 徳昆 / 建之

善光寺事務局(2009)によれば、善光寺地震で亡くなった人びとを供養するために、上田の豪商である土屋仁輔が発願者となり建立し、2500余人の遺骨が埋葬されたものである。

4.3 一字一石供養塔

善光寺地震の横死塚の右横にはもう一つの石碑が建っている(図20)。碑文は以下の通りである。

(正面)
 奉書寫 大乘妙典 / 阿彌陀經 / 光明真言一字一石供養塔



図19 善光寺地震の地震横死塚



図 20 地震横死塚の隣にある一字一石供養塔

(左面)

右書寫旨趣者擬弘化四年變災横死
 靈魂往生極樂證大菩提資糧者也
 弘化五年戊申二月
 別當大勸進現住大佛頂院權僧正山海敬白

(右面)

隨喜書寫法華經壹部 院内緇素等

地震の翌年 1948 (弘化 5) 年に「大勸進」の山海僧正など一山の僧侶はもとより僧俗一体となって、死者の霊を弔うために経文の一字一字を一石一石に書写してここに埋めて建立された供養塔である。

4.4 比較と建立の経緯

図 18 と図 19 から分かるように、関東大震災の横死塚は形状からして善光寺地震の横死塚と瓜二つで

ある。図 21 は台座正面の比較であるが、字体までそっくりである。また、背面に石工の名前や地震発生年月日が書かれているのもよく似ている。建立者については、関東大震災では、背面の最後に「善光寺建之」と書かれているが、善光寺地震の方では世話方や世話人を刻む必要があり、また建立者が民間人の土屋仁輔であり、出身地などを刻む必要もあったことなどから、右側面に回り込んで発願者として名前が刻まれている。図 22 はその部分の比較である。

塔身の四面に刻まれた種字もまったく同じである。小林 (1977) には改葬前の善光寺地震の地震横死塚の写真があるが、関東震災横死塚の前にある香炉と同型の香炉も写っている。以上のことから、関東大震災の横死塚の建立に際し、善光寺地震の横死塚が手本とされたことはほぼ間違いない。

関東大震災の横死塚の由緒について情報を集めるべく、忠霊殿でうかがったところ分る方がおられず寺務所を紹介された。寺務所を訪れ資料を探していただいたが、本稿で引用している小林 (1977) 以上のことは分からなかった。碑文にあるように建立者は善光寺であり、善光寺地震の際に一山をあげて犠牲者を供養したように、関東大震災に際しても同様のことが行われたのだろうか。

長野市教育会によって 1930 年に発行された『善光寺小誌』によれば、忠霊殿の説明として、「日清、日露、日獨戦役の戦死者霊及び関東震災諸霊を祀る。」と書かれている。忠霊殿は 1906 (明治 39) 年に創建され、1970 (昭和 45) 年に現在の姿に改築されており、以前は関東大震災の犠牲者の慰霊にも係っていたと推察される。一方最近の『信州善光寺案内』



図 21 関東震災横死塚 (左) と善光寺地震の地震横死塚 (右) の台座正面の記載比較



図 22 関東震災横死塚（左）と善光寺地震の地震横死塚（右）の建立者の記載の比較

[善光寺事務所(2009)]では、日本忠霊殿・善光寺史料館の説明として「戊辰戦争から第二次世界大戦までに亡くなられた240万余柱の英霊が祀られていて、御本尊は善光寺如来様の分身仏です。」とあるだけで、関東大震災のことは忘れられたようにどこにも書かれていない。

関東大震災の供養塔には、善光寺地震と同様に「横死塚」と書かれており、また宝篋印塔であることから、おそらくその場に遺骨が埋葬されたものと思われる。また遺骨が分骨されたものであるということは、碑文に記載されている通りである。

関東大震災では東京や横浜を中心に大量に死者が出たため、それらはそれぞれの地域で茶毘に伏され、個人の判別も難しかった。このため遺族の求めに応じて分骨された場合も多い。例えば、最も多くの犠牲者が茶毘に伏された東京本所の被服廠跡では、東京市が大正14年3月まで遺族や縁者の求めに応じて分骨を行ったという記録がある[東京震災記念事業協会清算事務所(1932)]。また、先に述べたように、日泰寺の慰霊堂に納められた遺骨も、慰問使6名が東京横浜を中心に数十の火葬場を弔問し多数の遺骨を拾集して帰山した結果であると記されている。このような状況を考えると、善光寺でも遺族や関係者の要望に沿って供養のために分骨を受け入れたとして不思議ではない。

5. 考察

名古屋市の日泰寺や照遠寺の慰霊碑と長野市善光寺の横死塚の由来については、現状、これ以上の情報はなく、あくまで推測の域を出ない部分が多いが、震災後の避難者の動向などを整理しながらさらに考

察を加えることにする。

『大正震災志』下巻[内務省社会局(1926)]には、関東大震災時の全国の府県の対応状況がまとめられている。それによれば、愛知県は、9月2日午前2時日本電報通信社名古屋支局員より大震災の情報を得たのを始まりに、官民挙げての対応に立ち上がった。その結果、9月5日には愛知県知事、名古屋市長、商業会議所会頭、県農会長などを中心に県下各階の代表者や有力者数百名に働きかけて愛知県救済会を発足させ救援にあっている。

一方、県内への避難民は9月4日午後4時に名古屋駅に到着した300名を最初に、9月30日までに総計で15万742人に達したと記載されている。内訳は名古屋駅14万2523人、熱田駅572人、千種駅5064人、大曾根駅1494人、名古屋港1819人である。北原(2011)は愛知県公文書館の「震災関係書類」から通過者も含めて11万3001人という数字を示している。いずれにしても大量の避難民が押し寄せたことは間違いない。これに対して青年団、在郷軍人会、婦人会、信仰団体、社会事業団体などが救護にあたった。

当初避難者に対し名古屋市は取りあえず名古屋駅前広場に大天幕を張って応急宿舎にしたが、その増加にとっても追いつけなかった。そのことを耳にした寺院、教会、富豪はもとより貧者の一燈でも一人でも二人でも宿泊させたいと申し出るものがあり、県市の救護活動上多大の便宜を得たと『大正震災志』下巻は記している。さらに同誌はこれを「同情心の翕然」と述べている。「翕然」(きゅうぜん)とは「多くのものが一つに集まり合う」ことを言い、まさに、同情心の「翕然」が日泰寺や照然寺の慰霊碑建立に

繋がったのではないかと考えられる。

一方、国は震災後の11月15日に、全国一斉に国勢調査並の震災罹災者人口調査を行っている。北原(2012)は、その結果を引用して各県毎の罹災者の現存数をまとめている。それによれば愛知県では2万3118人の罹災者がこの時点でまだ親戚、知人やなんらかの伝手のある場所に避難していたことが分る。このような人々の中には、肉親、知人を震災で失い、自らも負傷していた人も少なくない。

これに対して、長野県は地震による直接の被害も多少あったが、9月1日午後5時に信越線の乗客から東京方面における大震災の情報が入るやいなやただちに救援活動を開始した。その様子は『大正震災志』下巻だけではなく『長野県震災誌』[長野県(1929)]としてもまとめられている。震災当初、東京方面から地方への連絡は、信越線と東北線のみであったため、大量の避難民が押し寄せ、特に中央線への乗り継ぎ駅であった篠ノ井駅では9月4日から9月17日の間に5万7440人に達した[北原(2011)]。また、各駅で医療救護を受けた人は2万8300人に達した[長野県(1929)]。

また、愛知県同様11月15日現在の罹災者現存数を見ると、1万9744人と依然かなりの数にのぼっていることも分る[北原(2012)]。『長野市誌』第14巻[長野市誌編纂委員会(2002)]には、長野市における震災罹災者人口調査結果が掲載されており、それによれば、11月15日時点で、東京、横浜などから逃れてきた罹災者の現存数は1888人で、彼らが震災で亡くした家族数は65人である。長野県全体の現存罹災者が同様の比率で家族を亡くしていたとすれば、その数は700人近くになる。これらの人々が死亡した家族の“しるし”として分骨を受け、善光寺に納めた可能性も考えられる。また、善光寺は全国に多くの信徒を持つ有名寺院であり、長野県への避難者だけではなく、全国各地の罹災者から家族や肉親の遺骨が寄せられたということも考えられる。

武村(2012)によれば、東京本所の被服廠跡に建つ東京都慰霊堂の近くに浄土宗回向院があり、そこに建つ万人塚と呼ばれる慰霊碑には、1657(明暦3)年の明暦の大火以来、江戸で地震や大火などで非業の最期を遂げた横死者の遺骨が納められている。関東大震災の際にも、遺族や縁者の要望に応じて被服廠跡に建つ震災記念堂(のちの東京都慰霊堂)から、分骨された遺骨の多くが万人塚に納められたと

言われている。その背景には、震災記念堂はあくまで無宗教の施設であり、犠牲者の御霊を阿弥陀様の下で安らかに眠らせてあげたいと言う残された人々の思いがあったと言われている[武村(2012)]。善光寺の関東震災横死塚建立の由来を示唆する事例である。

以上のような震災後の様々な経緯を踏まえて、善光寺が建立した関東震災横死塚の由来を考える必要がある。

最後に横死塚の記載から建立された日付が1926(大正15)年6月であることから、その日付前後の信濃毎日新聞に何らかの関連情報を含む記事がないかと調べたが、有効な情報を得ることができなかったことを付記しておく。

6. おわりに

震災による犠牲者の慰霊碑や記念碑は被災地にあるものと思い込んでいた筆者にとっては、被災地から離れた名古屋市や長野市に慰霊碑があること自体驚きであった。本文でも述べたように、建立の由来については、解き明かされていない部分が多く、本稿での報告は甚だ不十分なものであると言わざるを得ない。しかしながらその分、筆者が震災における救援・救済の在り方や広域避難の課題などを広く知るきっかけとなったことも事実である。

調査結果を元に、筆者が所属する名古屋大学減災連携研究センターでは、2015年8月26日~9月26日まで、「東海地方における関東大震災の記録」と題して、名古屋市の日泰寺における慰霊堂や慰霊碑の紹介を含む企画展示が行われた。名古屋市民を始め全ての来館者に、地震防災に関する新しい視点を提供できたのではないかと思う。

そのような中で、関東大震災当時、名古屋市では1891(明治24)年の濃尾地震、長野市では1847(弘化2)年の善光寺地震の記憶がまだ鮮明であったことも、慰霊碑建立に何らかの影響を及ぼしたのではないかということも考えた。

調査に際して多くの方々に、情報提供をはじめご協力いただいた。まず、日泰寺に関東大震災の慰霊堂があることは1944(昭和19)年の東南海地震の三菱重工道徳工場の慰霊碑に関連して知り合いになった市内在住の高橋信氏から教えていただいた。調査の過程で、北原糸子氏の日泰寺への取り計らいで慰霊堂の内部を見ることができた。また、照遠寺の

慰霊碑については、応用地質（株）の小山彰氏と宮尾浩一氏から情報をいただいた。さらに善光寺に慰霊碑があることは、京都大学大学院人間・環境学研究所の加藤護氏より教えていただいた。調査に際しては、日泰寺ならびに善光寺の関係各位に大変お世話になった。これらの方々に心より感謝申し上げます。本研究の一部はJSPS KAKENHI 25350496の助成を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 石黒喬大, 新井賢一, 他, 2014, 埼玉県さいたま市に残る 1923 年関東地震に関する石碑, 歴史地震, 第 29 号, 111-128
- 2) 石黒喬大, 新井賢一, 他, 2015, 埼玉県さいたま市に残る 1923 年関東地震に関する石碑その 2, 歴史地震, 第 30 号, 139-148
- 3) 北原系子, 2011, 関東大震災の避難民-地方の行政資料から, 災害復興研究, Vol.13, 141-165
- 4) 北原系子, 2012, 関東大震災における避難者の動向 - 「震災死亡調査票」の分析を通して, 災害復興研究, Vol.14, 43-51
- 5) 小林斎, 1977, 善光寺之碑文集, 長野郷土誌研究会, 146pp
- 6) 長野県, 1929, 長野県震災誌 (関東震災と長野県), 582pp
- 7) 長野市教育会, 1930, 善光寺小誌, 大正堂書店, 108pp
- 8) 長野市誌編纂委員会, 2002, 長野市誌第 14 巻資料編近現代, 887pp
- 9) 内務省社会局, 1926, 大正震災志下巻, 836pp
- 10) 日泰寺, 2013, 覚王山日泰寺略記 (パンフレット)
- 11) 坂口英伸, 2014, 「関東震災歿死名簿」の一万年保存計画, 東京大学文学部・大学院人文社会系研究科第 25 回研究会資料.
<http://www.l.u-tokyo.ac.jp/CR/acr/kenkyukai/kenkyukai25.html>
- 12) 笹本正治, 2007, 善光寺の不思議と伝説, 一草舎出版, 330pp
- 13) 橘宗一少年の墓碑保存会, 1985, 九月は苦の月-橘宗一少年の墓碑保存運動の十年, 40pp
- 14) 武村雅之, 2012, 関東大震災を歩く-現代に生きる災害の記憶, 吉川弘文館, 328pp
- 15) 武村雅之, 2014, 横浜市における関東大震災の慰霊碑・記念碑・遺構, 横浜市都市発展記念館紀要, No.10, 2-53
- 16) 武村雅之, 小山彰, 宮尾浩一, 2014a, 名古屋市における関東大震災の記念碑の調査 - 日泰寺の慰霊堂と慰霊碑の由来を主に, 中部「歴史地震」研究年報, 第 2 号, 61-70
- 17) 武村雅之, 都築充雄, 虎谷健司, 2014b, 神奈川県における関東大震災の慰霊碑・記念碑・遺構 (その 1 県中部編), JSPS KAKENHI 25350496 報告書, 100pp
- 18) 武村雅之, 都築充雄, 虎谷健司, 2015, 神奈川県における関東大震災の慰霊碑・記念碑・遺構 (その 2 県西部編 (熱海・伊東も含む)), JSPS KAKENHI 25350496 報告書, 148pp
- 19) 東京震災記念事業協会清算事務所, 1932, 被服廠跡, 436pp
- 20) 内田魯庵, 1994, 新編思い出す人々 (紅野敏郎編集), 岩波文庫, 437pp
- 21) 善光寺事務局, 2009, 信州善光寺案内, しなのき書房, 131pp

火山ガス

平林 順一¹⁾

1) 東京工業大学 名誉教授

1. はじめに

110 の活火山を有する火山国日本では、毎年複数の火山が噴火している。しかし、1955 年以降活発な爆発的噴火を繰り返している桜島を除けば、2000 年の有珠山、三宅島の噴火以後は、異常なほど火山活動が低調であった。

2011 年 1 月 27 日に霧島・新燃岳でサブプリニアン噴火が発生し、2 千万 m³ の軽石と火山灰を放出した。また、2014 年 9 月 27 日に木曾御嶽山で、63 名の死者・行方不明者を出す噴火が発生したことは記憶に新しい。このほか、各地で火山が噴火し、地震の群発、地熱・熱水活動の活発化なども起こり、日本の火山活動は活発な状態に戻った。しかし、このような状態は必ずしも異常ではなく、火山国日本では驚くべきことではない。

噴火は、マグマにかかる圧力の低下やマグマの結晶化などによって、マグマ中の揮発性物質が発泡し、マグマが上昇することで発生する。また、水蒸気爆発は、マグマからの熱や高温の火山ガスが地下水を一気に気化することで発生する。このように、噴火を引き起こす大きな要因の一つが火山ガスである。

火山ガスは、物質の中で移動性が高く、地下(マグマ)の情報をいち早く地表に伝える媒体である。このため、火山ガスの化学組成や放出量とその変化はマグマやマグマと地表間で起こる様々な現象を知る手がかりとなる。一方で、火山ガスには毒性を有する化学成分が含まれており、火山ガスによる中毒事故がしばしば発生する。

本報では、最近活発となった火山活動と、活動によって発信される噴火警報、火山ガスの特性、放出量、火山ガス研究から得られる知見、火山ガス災害などについて述べた。

2. 最近の火山活動と噴火警戒レベル

2011 年霧島新燃岳噴火に続いて、2013 年 11 月 21 日に、小笠原父島の西方約 130km に位置する西ノ島の近くで噴火している新たな島が確認された。新しい島の噴火活動は続き、噴出した溶岩は旧西ノ島と合体し、さらに大きな島へと成長し

ている。現在までに噴出した溶岩量は、約 4 億トンである。西ノ島のように、長期間にわたって溶岩流出を続ける活動は日本では珍しい。

2014 年 8 月 3 日に口永良部島新岳で水蒸気爆発が発生し、噴火警戒レベルが 3 に引き上げられ、半径 2km 以内の立ち入りが規制された。以後、噴火警戒レベル 3 の規制が続いていたが、本年 5 月 29 日に、火砕流が海岸まで到達する大規模なマグマ水蒸気爆発が発生した。このため、気象庁は噴火警戒レベルを 5 に引き上げ、全島民 137 名が島から避難した。現在も島民の避難生活が続いているが、最近、火砕流を伴う大きな噴火発生の懸念が薄れたことから、立ち入り規制範囲がおおむね 2.5km に改められ、年内に帰島するべく準備が進められる。

阿蘇山でも 5 月 27 日に噴火が発生し、噴火警戒レベル 3 の入山規制となった。その後も断続的に活動が続き、中岳第一火口ではストロンボリ式噴火が見られるようになったが、8 月には一旦活動を停止した。9 月 14 日に再び噴火が発生し、再び噴火警戒レベルが 3 に引き上げられた。

また、2000 年以後南岳火口で爆発的噴火の発生が少なくなっていた桜島では、2006 年に昭和火口での噴火活動を再開した。同火口での活動は 2009 年以後一段と活発となり、年間の爆発回数は 1000 回を超える年もあった。このような状況のなか、本年 8 月 15 日に、1 日に 1000 回を超える地震の発生と、約 200 万 m³ のマグマ貫入による山体膨張が観測され、噴火警戒レベルが 3 から 4 (避難準備) に引き上げられ、火口から 3km 以内の住民は一時避難した。

箱根山では、5 月から地震活動が活発となり、6 月下旬にごく小規模な噴火が発生したため、大涌谷を中心に半径 500m の立ち入りが禁止となった(噴火警戒レベル 2)。7 月 2 日には、局所的な山体膨張や地震の発生状況などから噴火警戒レベルは 3 に引き上げられ、半径約 1km 以内が立ち入り禁止となったが、地震活動の減少、山体膨張の停止などから 9 月 11 に噴火警戒レベルは 3 から 2 に引き下げられた。

表 1 噴火警戒レベル(気象庁)

種類	名称	レベル	キーワード
特別 警報	噴火警報 (居住地域)	5	避難
		4	避難準備
警報	噴火警報 (火口周辺)	3	入山規制
		2	火口周辺規制
予報	噴火予報	1	活火山であることに留意

このほか、草津白根山、霧島硫黄山、蔵王山、阿弥陀ヶ原などでは地震や火山性微動の発生、地熱活動の活発化などから火口周辺に立ち入り規制がとられている。

現在、箱根山をはじめ 6 火山ではレベル 2 が、阿蘇山と桜島ではレベル 3 が、口永良部島にはレベル 5 の警報が出されている(2015 年 10 月 7 日現在)。

気象庁は、47 火山(さらに 3 火山が追加される)で常時監視を行っているが、噴火警戒レベル(2007 年 12 月から運用開始)が導入されている火山は 30 に留まっている。

尚、噴火警戒レベルは、火山ごとに規制の範囲などが異なる。

3. 火山ガス

3.1 火山ガスとは

北方領土と海底火山を除く約 7 割以上の火山から常時火山ガスが放出されている。火山ガスは、地下のマグマに溶けている水素(H)、酸素(O)、塩素(Cl)、イオウ(S)、炭素(C)、窒素(N)等の揮発性成分が圧力低下などによって発泡し、水蒸気(H₂O)、フッ化水素(HF)、塩化水素(HCl)、二酸化硫黄(SO₂)、硫化水素(H₂S)、二酸化炭素(CO₂)、水素(H₂)、窒素(N₂)、一酸化炭素(CO)、メタン(CH₄)などとなって地表に放出される。マグマから分離した火山ガスは、地表に到達するまでの間に、地下水との接触、ガス成分相互の反応、地下にたまっているイオウや有機物からの SO₂、H₂S、CO₂、CH₄などの供給など、さまざまな原因で、火山によって、あるいは噴出している場所、温度などによって含まれる成分と濃度が異なる。

一般に、火山ガスの主成分は水蒸気(H₂O)で 90%以上含まれる。H₂O 以外の化学組成は、噴出するガスの温度によって異なり、温度の高い火山ガスには HF、HCl、SO₂、H₂、CO などが多く含まれ、温度の低い火山ガスでは H₂S、CO₂、N₂などが主成分となる。表 2 に温度の違いによる火

山ガス組成の例を示した。

火山ガス組成の違いは、マグマの性質によって、溶解している揮発性成分量が異なることや、温度に依存するだけでなく、マグマから揮発性成分が上昇する過程で、地下に堆積するイオウ、山体内の地下水の有無などを反映した結果である。

すなわち、火山ガス組成の変化に着目すれば、火山の活動状態を把握することができる。例えば、桜島では活動の活発化の前に H₂ ガス濃度の上昇や、HCl/SO₂ 比の増大が観測されている(hirabayashi et al., 1986)。

草津白根山では、1976 年の水釜噴火前に、噴出した水釜火口周辺に SO₂ に富んだ組成を持つ新たな噴気が出現し、また、周辺の火山ガス中の SO₂/H₂S 比が著しく大きくなるなどの化学的变化が観測され、噴火を予測すること成功している(Ossaka et al., 1980)。

火山ガス成分の溶解度は、圧力に依存するが、成分によって依存度が異なる。この性質を利用して、火山ガスの組成比(例えば、H₂O と CO₂ の比)から、火山ガスがマグマから分離する深さを推定することができる。

また、火山ガス中の水蒸気の酸素と水素の同位体比を測定することによって、水蒸気がマグマ由来であるか、地表付近の地下水を取り込んでいるかを知ることにもできる。

3.2 火山ガス採取と測定

一般に、火山ガスは、噴気孔にパイプを挿入してアルカリ溶液を入れた注射器や真空ボトルを用いて採取し、化学分析によってその化学組成を求める。しかし、噴火活動中や直接採取することが困難な場合は、無線操縦の飛行機(飛行船、カイトプレーン)を用い、これに装着した真空ビンやテトラバックなどの容器で採取することもある。また、火口から離れた場所にアルカリ溶液を設置しこれに吸収された火山ガスや、火山灰に付着した火山ガス成分の測定によって、ガスの組成比が求められている。

最近では、湿式化学分析を行える分析化学者は限られているため、各種ガスセンサーを組み合わせて、噴気孔直接でなく、火口や噴気孔周辺のガス濃度の測定を行い、ガス組成比を求める方法も用いられている(Shinohara, 2005)。

3.3 火山ガス放出量

表 2 火山ガスの温度と化学組成 (V %)

火山	温度	H ₂ O	HF	HCl	SO ₂	H ₂ S	CO ₂	He	H ₂	O ₂	N ₂	CO
Surtsey	1137	86.2		0.40	3.28		4.79		4.74	0	0.07	0.38
Unzen	810	97.2		0.196	0.498	0.196	1.28		0.586	0.079	0.148	0.1261
Satuma-Iwo	877	97.5	0.033	0.677	0.984		0.316	3E6	0.474	5E5	8.2E3	1.1E3
	740	97.8	0.048	0.00	0.975	0.075	0.561		0.396		0.035	
Kuju	580	96.9		0.066	0.12	2.34	0.55					
	400	96.9	0.097	0.48	0.69	1.41	0.45		0.10		0.015	2.4E4
	350	98.9	0.008	0.20	0.20	0.37	0.29	5E6	3.1E3		4.4E3	
	185	99.2		0.0079	0.066	0.202	0.506		0.015		7.4E3	2.3E5
Nasu	530	98.0	0.014	0.06	0.178	0.712	0.952					
Kiso-Ontake	110	98.4		0.0003	0.018	0.323	1.254	4E6	7.3E4	1.8E4	3.8E3	
Kusatsu	95	97.8		0.0	0.2E3	0.285	1.779	6E6	2.1E5		0.36	
Kirishima	98	97.4			3.4E3	0.660	1.92	3E6	1.4E3	3.3E4	0.018	

Surtsey のガス組成は, Sigvaldason, G. E.(1968)

Kuju のガス組成は, Mizutani et al. (1986)

火山の活動状態やマグマからの脱ガス状態などを知るうえで、火山ガスの放出量の観測が重要である。また、爆発的噴火が起こる前に、火口からの火山ガス放出の停止し、あるいは放出量が著しく少なくなる現象がしばしば目撃される。このことは、火口直下浅部で火山ガスが蓄積し、圧力が上昇して爆発的噴火の引き金となることを示している。このため、噴火メカニズムの解明にも、火山ガス放出量の観測は欠かすことができない。火山ガスのうち、直接放出量を測定できる成分はSO₂のみである。これは、二酸化イオウが特定波長の紫外線を吸収することを利用し、噴煙による太陽からの紫外線の減衰を測定する（最近では、紫外線相関スペクトロメーター（COSPEC）に代わって CCD 分光器を用いた小型の計測器（DOAS）が用いられている）。また、火山ガスの主成分である水蒸気量は、噴煙を Plume rise と見なし、その上昇過程を追うことで求めることができる。

噴気孔からのガスについては、ピトー管と圧力計を用いて流速を求め、これとガスの密度（実際には水蒸気の密度で代用することが多い）、化学組成から放出量を測定することができる。

土壌ガスについては、地中にパイプを打ち込み、一定時間後にパイプ内に溜まった各ガス成分の濃度測定し、その分布などを調べる。また、地表から拡散放出される二酸化炭素量は、チャンバー法

で測定する。

火山から放出される SO₂ 量は、マグマの性質や活動状況によって異なるが、定常的放出量は日量数十～数千トンである。Mori et al. (2013) は 1975 年～2006 年の測定に基づき、22 火山から放出量される SO₂ 量を取りまとめている（表 3）。それによれば、6 火山での放出量は極めて少なかった。

一方、放出量のもっとも多かった火山は、三宅島で、2000 年噴火後の一時的に約 20 万トン/日の SO₂ 放出が観測されている。この値は日本の全ての火山から放出される平均的な放出量 6,000 トン/日の約 30 倍に相当する。この異常な SO₂ 放出量は、地深部から火口直下浅部に大量に注入された玄武岩質マグマに由来する。この大量の火山ガス放出により、噴火後しばらくの間、島の居住地域でも許容濃度（2ppm）をはるかに超える SO₂ 濃度がしばしば観測された。SO₂ 放出量は時間経過にともなって徐々に減少し、噴火 4 年後には 1,000～2,000 トン/日まで少なくなった。これにより、場所は限定されたものの 4 年半ぶりに帰島することが可能となった。噴火から 15 年が経過した現在、三宅島からの SO₂ 放出量は数百トン/日と極めて少量となっている。

表 3 日本の火山からの SO₂ 放出量(1975-2006)

火山	最高放出量	最低放出量	平均放出量
雌阿寒岳	12	2.6	6
アトサヌプリ	n.d.	n.d.	0
十勝岳	210	140	175
樽前山	24	4.6	15
倶多楽	n.d.	n.d.	0
有珠山	169	n.d.	8
岩手山	0.1	0.1	0
吾妻山	n.d.	n.d.	6
那須岳	n.d.	n.d.	0
浅間山	4,600	25	360
箱根山	n.d.	n.d.	0
伊豆大島	520	30	30
三宅島	199,000	1,100	2,190
九重山	260	3	27
阿蘇山	3,750	19	410
雲仙岳	230	0.1	14
霧島山	20	n.d.	8
桜島	5,480	110	1,641
薩摩硫黄島	1,760	260	574
口永良部島	48	43	1
中之島	40	40	40
諏訪瀬島	1,130	300	579
合計			6,013

Mori et al. (2013) Table 1 より編集 (ton/day)

* : Time-averaged SO₂ flux of six-monthly data for 1975-2006

前述したように、測定した 22 火山からの平均 SO₂ 放出量は、6,000 トン/日であるが、地熱活動活発化した箱根山、吾妻山などでの放出量増加や口永良部島の最近の SO₂ 放出量が 2,000 トン/日、9 月に噴火した阿蘇山の放出量 1,700 トン/日であること、十分な測定が行われていない火山などを考慮しても日本の火山からの平均的な SO₂ 放出量は 6,000 トン/日程度と考えると差し支えない。火山ガスの平均的な SO₂ ガスの含有量は、水蒸気含有量の 0.01 程度と考えられる。表 3 に示されている火山は SO₂ が測定できる放出量を持つ火山で、これら火山を含め日本の陸上で定常的に火山ガスを放出している火山は約 60 火山あるこ

とも考慮すると、放出される火山ガス放出量は、日量 200,000 ~ 300,000 トン程度と考えられる(但し、地熱井からの放出量は除く)。

また、大噴火が発生した場合には、大量に放出された火山ガスは火山灰など微粒子と共に成層圏まで到達し、世界的な気温の低下が起こる。たとえば、アイスランド Laki 火山 1888 年噴火時には H₂SO₄ に換算して 3×10⁷ トンの硫黄化合物が放出され、世界の平均気温が約 1 度低下した (Sigurdsson, 1989)。

4. 火山ガスの毒性とガス中毒事故

火山ガスに含まれる成分のうち、HF、HCl、SO₂、H₂S、CO₂、CO は毒性を有し、これまで火山周辺でたびたび中毒事故を引き起こしてきた。

世界で最も大きな火山ガス災害は、1986 年 8 月に発生したアフリカ・カメルーン国 Nyos 湖の事故で、約 1,700 名が犠牲となった。Nyos 湖は長径約 2km、短径約 1km、水深 200m のバケツ状の地形で、深部湖水には湖底から定常的に CO₂ が供給されている。このため、事故の起こる前の深部湖水は CO₂ ガスが飽和に近い濃度であった。事故当時の Nyos 湖周辺は雨期であり、冷たい地表水の流入などで深部湖水が上昇し、溶存していた CO₂ が発泡したために、短時間に湖水中に溶存していた CO₂ 約 1Km³ が湖面から放出されと考えられている。

Nyos 湖の災害ほど大規模ではないが、1979 年にインドネシア ディエン高原でも CO₂ ガスによって 142 名の死者がでるガス災害が発生した (Le Guern, 1982)。この事故は、火口から放出された 100% 近い高濃度の CO₂ ガスが山体に沿って流下している場所に、噴火から避難してきた多くの人が入り込んだために発生した。

日本でも、量は少ないものの湖底から CO₂ が供給されている湖もあるが、日本には四季があるために少なくとも年に 1 回は湖水が循環し、湖水中に大量の CO₂ が蓄積されることはない。

日本では一度に大勢の犠牲者は出ていないが、火山ガスによる事故が 1950 年以降 13 の火山で発生し、平均して毎年約 1 人が亡くなっている。表 4 に 1950 年以降、日本で発生した火山ガス中毒事故をまとめた。また、表 5 には、毒性を持つ火山ガス成分の臭気を感じ始める濃度、致死濃度、許容濃度を示した。

表 4 1950 年以降, 日本で発生した火山ガス事故

年 月 日	場 所	事故内容	死者	ガス
1951/11/5	箱根湯の花沢	露天風呂,	2	H ₂ S
1952/3/27	同上	浴室,	1	H ₂ S
1954/7/21	立山 地獄谷	露天風呂,	1	H ₂ S
1958/7/26	大雪山 御鉢平		2	H ₂ S
1961/4/23	立山 地獄谷		1	H ₂ S
1961/6/18	大雪山 御鉢平		2	H ₂ S
1967/11/4	立山 地獄谷	キャンプ	2	H ₂ S
1969/8/26	鳴子	浴室	1	H ₂ S
1970/4/30	立山 地獄谷	温泉作業	1	H ₂ S
1971/12/27	草津白根山	スキー	6	H ₂ S
1972/10/2	箱根 大涌谷		2	H ₂ S
1972/12/28	那須岳 湯本	浴室	2	H ₂ S
1972/11/25	立山 地獄谷	温泉作業	1	H ₂ S
1975/8/12	立山 地獄谷		1	H ₂ S
1976/8/4	草津白根山	登山	3	H ₂ S
1980/12/20	安達太良山	雪洞	1	H ₂ S
1985/7/22	立山 地獄谷	湯だまり	1	H ₂ S
1986/5/8	秋田焼山	谷	1	H ₂ S
1989/2/12	阿蘇 中岳	火口縁	1	SO ₂
1989/8/26	霧島 新湯	浴室	2	H ₂ S
1989/9/1	那須岳	作業中	3	H ₂ S
1990/3/26	阿蘇 中岳	火口縁	1	SO ₂
1940/4/18	阿蘇 中岳	同 上	1	SO ₂
1990/10/19	阿蘇 中岳	同 上	1	SO ₂
1994/5/29	阿蘇 中岳	同 上	1	SO ₂
1997/7/12	八甲田 沼の平	ガス穴	3	CO ₂
1997/9/15	安達太良	登山	4	H ₂ S
1997/11/23	阿蘇 中岳	火口縁	2	SO ₂
2005/12/29	湯沢 泥湯温泉	雪洞	4	H ₂ S
2010/6/20	八甲田 酸ヶ湯	山菜取り	3	H ₂ S?
2015/3/18	秋田 乳頭温泉	温泉作業	3	H ₂ S

小坂ほか, 1998 を加筆・修正

表 4 から明らかなように火山ガス中毒事故の原因の 80% 以上は, H₂S ガスである。次いで SO₂ による事故が多いが, SO₂ によるガス事故は, 阿蘇山のみで発生している。CO₂ ガスによる事故は, 1997 年八甲田山麓沼の平の 1 件のみである(平

林, 1997)。

日本で H₂S による事故が多い原因は, 定常的に火山ガスを放出している火山の多くは観光地であり, 観光客や登山者が火山ガスの発生場所周辺に容易に立ちることができること, ほとんどの火山の火山ガス中に H₂S が比較的多く含まれること, 極めて低濃度でも臭気を感じるが, 時間経過に伴って徐々に臭気が感じられなくなること, 高濃度の H₂S ガスはあまり臭気がないことなどの理由で, 死に至る高濃度(約 700ppm 以上)の H₂S が滞留している場所に容易に近づくことができるためである。

表 5 火山ガス成分の毒性

ガス成分	臭気感じる濃度	致死濃度	許容濃度
HF	?	600 ppm*1	3 ppm
HCl*2	1 ppm	1,000 ppm	5 ppm
SO ₂ *3	0.3~1 ppm	500 ppm	2 ppm
H ₂ S	0.06 ppm	700 ppm	10 ppm
CO ₂ *4	臭気無	40 %	5,000 ppm
CO*5	臭気無	1,500ppm	50 ppm

*1: モルモットによる吸入致死濃度

*2: 10 ppm で粘膜が刺激される。

*3: 30~40 ppm で呼吸困難となる。

*4: 9%で5分, 10%で1分間でも死亡した例もある。

10~15%では数呼吸で昏睡状態になるとも言われている。

*5: 1,500 ppm の環境下に1時間滞在で生命危険となる。

これに対して, H₂S とともに SO₂ ガスを噴出している火山も多いが, SO₂ ガスは刺激的であり, 20ppm 程度の濃度で咳き込みや目に刺激を感じ, 死に至る高濃度の SO₂ が滞留している場所には近づくことはできない。このため, 直接高濃度の SO₂ ガスを吸引しての事故は起こりにくい。SO₂ による死亡事故が発生している阿蘇山では, 火口底近くに SO₂ に富んだ火山ガスが放出されているが, 火口縁まで上昇してくる間に希釈され致死濃度にはならない。しかし, 数 ppm の低濃度の SO₂ ガスでも喘息などの持病のある高感受性のある人は発作を起し, これが原因で死に至ったと考えられている。

日本で唯一発生した八甲田山麓の CO₂ ガス災害は, 夜間訓練中の自衛隊員 3 名が高濃度(15~20%)の CO₂ ガスが滞留していた深さ約 8m の穴に入り込んだために発生した。CO₂ ガスは, 死に至る高濃度でも無色・無臭のためにその存在に気が付かない。

参考のために、図 1 に北方領土と海底火山を除き、定常的に火山ガスが噴出している火山と、そのうち火山ガス災害が発生した火山の分布を示した。



図 1 定常的に火山ガスが出ている火山と、火山ガス災害が発生した火山の分布（除く、北方領土の火山と海底火山）

5. 火山ガス事故の防止にむけて

草津白根山では、ボーリングにより噴出させた火山ガスを、沢水を貯めた水槽に導入して温泉造成を行っていた。初めは冷たかった水槽の水は火山ガスを導入することによって温度が上昇し、水に溶解できなくなった H_2S , CO_2 が水槽から溢れ出し、谷地形のスキーコースに高濃度で滞留していたために 6 名が犠牲となった(1971 年)。また、1976 年には低温の噴気地帯の近接する登山道で H_2S により 3 名が亡くなった。これを受けて地元自治体は再発防止に向けて、草津白根山一帯の火山ガス噴出点とそれぞれの危険度の調査を実施した。これを基に、危険度別の H_2S ガス災害マップを作り、特に多くの観光客が集まる場所に注意を喚起する案内板を設置すると共に、立ち入りが容易でガス事後の再発が危惧される場所に自動測定・警報システムの設置を行った。これによって、以後草津白根山では H_2S によるガス災害は発生していない。

1997 年には、原因となったガス成分が異なるガス事故が八甲田山、安達太良山、阿蘇山で立て続

けに発生した。一連のガス事故を受けて、当時の科学技術庁は、「火山ガス災害に関する緊急研究」を立ち上げ、研究成果を立ち入り規制の見直し、登山道・自然公園計画等の見直し、火山ガス監視体制の強化等に活用するために、1) 火山ガスが地下のマグマから大気中に放出されるまでの過程、2) 火山ガスが大気中に放出された後の研究を行った。また、得られた研究成果を基に、火山ガス災害の特性や再発防止にむけ、一般市民への啓発活動も併せて実施した。

また、自治体等は危険地域の把握、危険地帯への立ち入り規制などの措置を取ったなどの理由で、しばらくは火山ガスによる人的被害は発生しなかった。

このような再発防止に向けた努力によってガス事故の発生頻度は少なくなったものの、2005 年には秋田県湯沢の泥湯温泉で 4 名が、2010 年には青森県酸ヶ湯温泉近くで 3 名、2015 年には秋田県乳頭温泉で 3 名が死亡する事故が発生している。

火山ガスによる人身事故を起こさないために、各自治体による火山ガス噴出地点とその危険度の調査、その結果に基づいた危険を喚起する案内板や規制柵の設置、必要があれば自動測定・警報装置の設置などの措置を講じることが重要である。一方、火山地帯を立ち入る人は、一人ひとりが、火山や火山ガスに対する最低限の知識を持つこと、立ち入る場所について自治体が設置した危険を知らせる案内を確認することが重要である。以下に火山ガス災害から自分を守るために知ってほしいことを纏めた。

- 1) 立ち入る地域に火山ガス噴出している場所があるかの確認。
- 2) 毒性のある火山ガス成分は、 CO を除き、いずれも空気より重く、窪地や谷地形などの低い場所に滞留する。
- 3) 登山道から外れたり、規制柵などを乗り越え、火山ガス噴出地域やガスが滞留している場所に近づかない。
- 4) H_2S などの臭気を感じたり、気分が悪くなった場合は、風上の高い場所の避難する。
- 5) また、火山ガスは水に溶けやすい為、濡れタオルなどで口を覆い呼吸する。

などに知識と行動によって、火山ガス災害をある程度防ぐことができる。万が一、近くの人が高濃度の H_2S などを吸引し、倒れた場合には、ガスが滞留して場所から風通しの良い高い場所に引き出すことで生命は確保できる。

参考文献

- 1) 科学技術庁 (1998): 平成9年度科学振興調査「火山ガス災害に関する緊急研究」の成果報告書.
- 2) Osaka, J., Ozawa, T., Nomura, T., Osaka, T., Hirabayashi, J., Takaesu, T. and Hayashi, T. (1980): Variation of chemical compositions in volcanic gases and waters at Kusatsu-Shirane volcano and its activity in 1976. *Bull., Volcanol.*, 43, 207-216.
- 3) 小坂丈予・平林順一・野上健二・山元雅弘 (1998): わが国における火山ガス人身災害の発生要因とその災害防止対策. *自然災害学*, 17-2, 131-153.
- 3) Mizutani, Y., Hayashi, S. and Sugisaki, T. (1986): Chemical and isotopic compositions of fumarolic gases from KUJU-Iwoyama, Kyushu, Japan. *J. Geochem. J.*, 20, 273-285.
- 4) Mori, T., Shinohara, H., Kazahaya, K., Hirabayashi, J., Matsushima, T., Mori, T., Ohwada, M., Odai, M., Iino, H. and Miyashita, M. (2013), Time-averaged SO₂ fluxes of subduction-zone: Example of a 32-year exhaustive for Japanese volcanoes. *JGR*, 118, 8662-8674.
- 5) Sigvaldason, G. E. and Elisson, G. (1968): Collection and analysis of volcanic gases at Surtsey, Iceland. *Geochim. Et Cosmochimi. Acta*, 32, pp.797-805.
- 6) Sigurdsson, H. (1989): Assessment of the atmospheric impact of volcanic eruptions, *Proceedings of the Conference on Global Catastrophes in Earth History*,
- 7) Shinohara, H. (2005): A New Technique to Estimate Volcanic Gas Composition; Plume Measurements with a Portable Multi-Sensor System. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 143, pp.319-333.
- 8) Hirabayashi, J., Osaka, J. and Ozawa, T. (1986): Chemical Study on volcanic gases at Sakurajima volcano, Japan. *JGR.*, 91, 12167-12176.
- 9) 平林順一 (1997): 八甲田山山麓の火山ガス災害. *地熱*, 19, 233.
- 10) Le Guern, F., Tazieff, H. and Faivre Pierrt, R. (1982), An example of health hazard: People killed by gas during a phreatic eruption: Dieng Plateau (Java, Indonesia), February 20th 1979. *Bull. Volcanol.*, 45, 153-156

屈折法地震探査の今昔物語

吉田 壽壽¹⁾

1) 日本物理探査株式会社 社友

1. はじめに

渡邊貫理学博士は、1935年に古今書院の地学辞典を発行し、地学の普及に勤めた人であり、そしてまた1942年には日本物理探査株式会社を創立し、社長として事業を始めた人物である。私は、1946年に入社し、入社してからの15年間に調査した箇所は、北海道から沖縄まで160箇所、東南アジア数カ所におよび、机に向かっての仕事よりも山や谷を歩きまわる仕事の方が多くあった。現場作業や解析業務について、懇切な指導をしていただいた。今は亡き上司を偲びつつ、当時を思い出しながらの昔話に、しばしお付き合いをお願いしたい。

2. ハギトリ法について

1938年萩原尊禮先生は、屈折波走時曲線から直接基盤の速度を求める"萩原の方法"を考案された。これは、低速度の表土層の厚さの変化により走時曲線が凹凸を呈し、基盤の速度が求めにくいことから考案された解析法である。

私達は1948年に新潟県の小千谷で、発電用の調整池建設のため、田圃上で屈折波探査を行った。調査結果の解析につきましては、表俊一郎先生から"萩原の方法"の解析について教えていただいた。

この方法は、走時曲線の足し算や引き算で若干手間取ったが、私より2年後輩の新入社員宮川善宏君が走時曲線の中点をデバイダーでとり、全走時の1/2との差を各走時から引けばと提案した。その後、上司の服部保正氏が両走時曲線の中点の値をそのまま全走時の1/2の線上に上下すればよいとして、解析作業が簡便に進められるようになった。本来このハギトリ法は地形も平坦な場所に適用されていたが、地形も山型で起伏のある所にも適用され、それなりの理論のもとで今日まで適用されている。

3. 屈折法探査のための発破振動と地震動について

屈折法探査では、振動源として、火薬を使用するため、地主さんの承諾を必要とする。しかし地震探査というと、地主さんは私が承諾したため地震が発生するのでは、近所の人から文句がでると

言われ、説得に時間がかかった。そこで私達のやるような地震探査は弾性波探査と呼ぶようになり、地元への説得も容易になった。

いまここで、地震動と発破振動について考えてみる。

振動による被害は、地震のときは加速度との対比で論じられるのが一般的ですが、発破振動の場合は変位速度の大きさを検討するのが普通である。これは、地震動に比べて発破振動の卓越周波数が高いからで、一般的に地震の卓越周波数は1~10Hzですが、発破振動の場合は50~100Hzである。このため、地震動と発破振動では、建物等への影響がちがう。

いま、振動が正弦波で表されるとして、変位の時間変化を y 、角振動数 ω 、 f を周波数として、 $\omega=2\pi f$ 、時間を t 、変位の最大値を A とすれば、 $y=A \cdot \sin(\omega \cdot t)$ なので、速度 v および加速度 α は上式を1回および2回微分して、速度および加速度を求めると次式となる。

$$v = \frac{dy}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) = A \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(\omega t)$$

$$\alpha = \frac{d}{dt} \frac{dy}{dt} = -A \cdot 2\pi \cdot f \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) = -A(2\pi f)^2$$

$$\sin(\omega t)$$

また、これらの最大値は

$$y_{\max} = A, \quad v_{\max} = 2\pi f A, \quad \alpha_{\max} = (2\pi f)^2 A$$

であるから、

$$v = 2\pi f A = \frac{2}{(2f)^2} \frac{f}{2f} A = \frac{A}{(2f)^2}$$

となる。

ここで、震度4の中震に相当する加速度70galの場合、地震の周波数を5Hz、発破振動の周波数を100Hzとして、振動を図3.1に示すような正弦波で表されるとした場合、上述した α 、 f を既

知として, v, A を求めて, その結果を表 3.1 に示す.

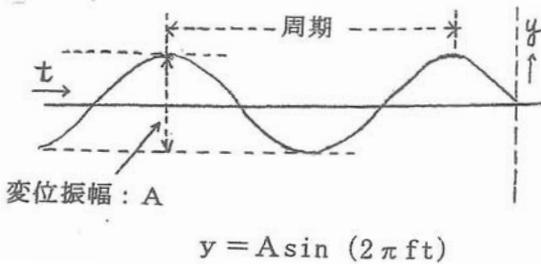


図 3.1 正弦波の振動成分

地震の場合

$$v = \frac{70}{2 f} = \frac{70}{2 \times 3.14 \times 5} = 2.23 \text{ cm/sec}$$

$$A = \frac{70}{(2 f)^2} = \frac{70}{(2 \times 3.14 \times 5)^2} = 0.071 \text{ cm}$$

発破の場合

$$v = \frac{70}{2 f} = \frac{70}{2 \times 3.14 \times 100} = 0.11 \text{ cm/sec}$$

$$A = \frac{70}{(2 f)^2} = \frac{70}{(2 \times 3.14 \times 100)^2} = 0.00018 \text{ cm}$$

である.

表 3.1 発破振動と地震動の比較

種別	地震動	発破振動
変位加速度 α (gal)	70 (震度4)	70
周波数 f (Hz)	5	100
変位速度 v (cm/sec)	2.23	0.11
変位 A (cm)	0.071	0.00018

表 3.1 から地震動で 70gal の場合の変位速度および変位が判明し, 70gal の中震の場合, 建物への影響は考えられるが, 同じ変位加速度を示していても, 発破振動の場合は, 周波数が大きいいため建物への影響は生じないことが分かる.

4. トンネル掘削によるゆるみ領域

4.1 切羽速度

弾性波速度 5km/s の岩盤内を掘削中に, 切羽で

速度測定をしたところ 1 km/s の速度であるため, 施工パターンの変更を要求され, 発注者は測定した私どもに検討を依頼した. 切羽面では最大でも 10m 程度しか測定できず, ハンマーのたたき力に達する距離はせいぜい 5~6m 程度であるためにそのような結果になったことを説明して諒解を得たことがある.

4.2 トンネル内弾性波速度測定

(1) 切羽面での速度測定

図 4.1 に示すように切羽面の一端をハンマーでたたき, 受振器 1~2 個を切羽面に密着させて振動の到達時間を測定し, 図 4.1 の中段に示すように, 起振点からの速度を求めている. 例えば地表弾性波探査で, その地点が 5.0km/s の岩盤内にあった場合, 切羽面では 0.8~1.3km/s とまちまちな値であり 5.0km/s の値を下廻っているということで, 岩質が悪いと判断している.

しかし, 測定された走時をそれぞれの位置にプロットして走時曲線を書いてみると図 4.1 の下段のようになる. 現場でこのような計算をすることは面倒であり, たとえ計算したとしても, 5.0km/s までの深さが判明しない限り地山全体が悪いのかどうかは判定できない. また, 切羽面では, 最大でも 10m 程度しか測定できず, ハンマーのたたき方にもよるが, 振動の到達距離はせいぜい 5~6m 程度である.

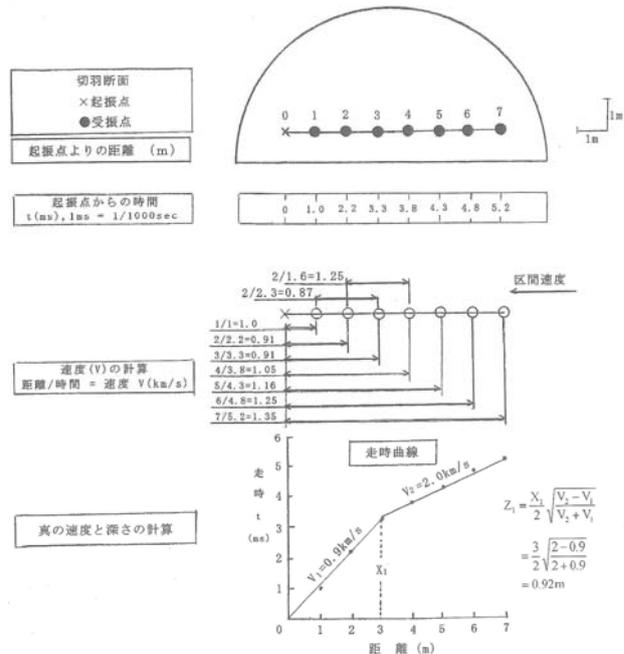
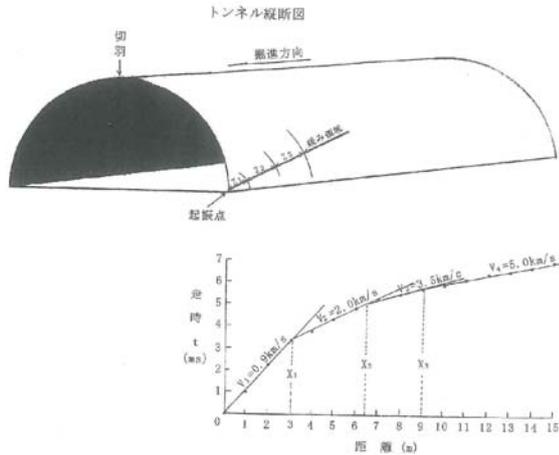


図 4.1 切羽面での速度測定

(2)トンネル側面速度測定



$$- 1.52 \frac{3.5\sqrt{5^2 - 2^2} - 5\sqrt{3.5^2 - 2^2}}{2\sqrt{5^2 - 3.5^2}} = 1.45\text{m}$$

図 4.2 トンネル側面に沿った速度測定

図 4.2 の上段に示すように切羽から掘削区間の側壁に沿って、切羽(距離 0)で少量の火薬を使って起振源とし、地表で使う器械で 15 個の受振器を使って振動の記録をとり、走時曲線を作成して図 4.2 の下段に示すような走時曲線が得られたとする。

このように、測定の長さを長く、起振力を強くして測定すれば地山速度 5.0km/s までの状況が把握される。場合によっては、岩盤速度が 3.0km/s で破碎質であることも分かる。

ゆるみ深さの計算式

$$Z_1 = \frac{X_1}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2 - 0.9}{2 + 0.9}} = 0.92\text{m}$$

$$Z_2 = \frac{X_2}{2} \sqrt{\frac{V_3 - V_2}{V_3 + V_2}}$$

$$- Z_1 \frac{V_2 \sqrt{V_3^2 - V_1^2} - V_3 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 \sqrt{V_3^2 - V_2^2}}$$

$$= \frac{6.5}{2} \sqrt{\frac{3.5 - 2}{3.5 + 2}}$$

$$- 0.92 \frac{2\sqrt{3.5^2 - 0.9^2} - 3.5\sqrt{2^2 - 0.9^2}}{0.9\sqrt{3.5^2 - 2^2}} = 1.52\text{m}$$

Z3=

$$\frac{X_3}{2} \sqrt{\frac{V_4 - V_3}{V_4 + V_3}} - Z_1 \frac{V_3 \sqrt{V_4^2 - V_1^2} - V_4 \sqrt{V_3^2 - V_1^2}}{V_1 \sqrt{V_4^2 - V_3^2}}$$

$$- Z_2 \frac{V_3 \sqrt{V_4^2 - V_2^2} - V_4 \sqrt{V_3^2 - V_2^2}}{V_2 \sqrt{V_4^2 - V_3^2}}$$

$$= \frac{9}{2} \sqrt{\frac{5 - 3.5}{5 + 3.5}}$$

$$- 0.92 \frac{3.5\sqrt{5^2 - 0.9^2} - 5\sqrt{3.5^2 - 0.9^2}}{0.9\sqrt{5^2 - 3.5^2}}$$

4.3 割れ目と速度

4.3.1 速度変化の原因

中・硬質の地山におけるトンネル坑内での速度値が 1~2km/s であるということは、主として岩石に発達する割れ目と含水状態に起因するものと考えられる。

大見,他(1977)は、孔隙率の小さい硬岩でも、乾燥状態と含水飽和状態では、P波速度の変化が著しいものがあることを認め、走査型電子顕微鏡を用いて岩石の孔隙構造を観察した。その結果速度変化の著しい岩石は、いずれも微細なクラック状孔隙を多く含んでいることをつきとめた。本荘,他(1979)によれば、新高瀬川地下発電所掘削に伴う内空周辺の弾性波速度の変化を調べた結果、掘削前の速度値は 4.53±0.41km/s であったが、掘削後の発電所周辺の岩盤(おおむね 20~30m 範囲)の中で平均 10~20%、最大 30%程度の変化が見られたと報告され、その原因として岩盤内を予め掘削されていたボーリング孔内でのポアホールテレビジョンによる節理間隙測定結果から岩盤の変形量はおおむねその区間の節理間隙の増大値に対応しているとしている。そして新高瀬川地下発電所に分布する花崗閃緑岩のような塊状堅硬でかつ節理を有する岩盤中の弾性波速度については Crack Porosity モデルが最も実態に即したものとした。以上述べた大見他(1977)、本荘他(1979)によるものは、いずれもクラックポロシテイモデルによるものであるが、計算手法に若干の相異があるので、それぞれの手法によって計算した結果を示した。

4.3.2 クラック状孔隙による速度変化の計算

(1)Walsh の式による方法

クラック状の孔隙すなわち回転楕円体の孔隙を含む速度の計算にあたっては、Walsh(1968、

1969)の式を用いた。いま、体積弾性率 K , K_s , K_w , K_f はそれぞれ、岩石全体, マトリックス, 水, および間隙内の含有物を示し, 剛性率 G , 密度 ρ も同じ添字をもって表し間隙率を ϕ とする。

$$\frac{K_s}{K} - 1 = -\frac{1}{3} \left[\frac{K_s - K_f}{K_s} \right] T_{ijj}$$

$$\frac{G_s}{G} - 1 = -\frac{1}{5} \left[\frac{G_s - G_f}{G_s} \right] \left(T_{ijj} - \frac{1}{3} T_{ijj} \right)$$

T_{ijj} および T_{ijj} は次のとおりである。

$$T_{ijj} = \frac{3(3K_s + 4G_f)}{3K_f + 4G_f + 3 G_s \left[\frac{3K_s + G_s}{3K_s + 4G_s} \right]}$$

$$T_{ijj} = 1 + \frac{8G_s}{4G_f + 3 G_s \left[\frac{3K_s + 2G_s}{3K_s + 4G_s} \right]} + \frac{2(3K_f + 2G_f) + 3K_s + 4G_s}{3K_f + 4G_f + 3 G_s \left[\frac{3K_s + G_s}{3K_s + 4G_s} \right]}$$

ここでは, α は aspect ratio (孔隙の縦横比) である。縦波の速度 V_p は次式で表される。

$$V_p = \sqrt{\frac{K + (4/3)G}{\rho}}$$

$$\rho = (1 - \phi)\rho_s + \phi\rho_f$$

ここで,

$$K_s = 4.4 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$K_w = 2.2 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$$

$$K_a = 1.5 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$$

$$G_s = 3.7 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$G_w = G_a = 0$$

$$\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$$

として, $\alpha = 0.01, 0.0001$ とし, K_f/K_w をパラメータとして計算した結果を図 4.3 に示した。

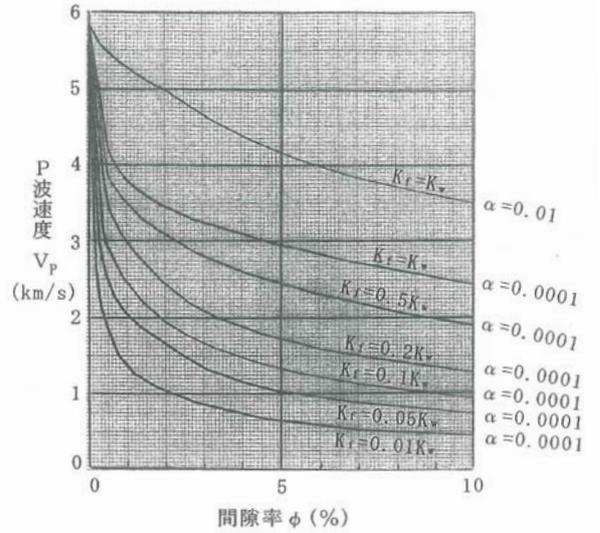


図 4.3 間隙率と P 波速度 (図中 α はアスペクト比を示す)

(2) 直列弾性係数による方法

本荘(1979)は, 新高瀨川発電所の地殻空洞掘削に伴う周辺岩盤のわずかな変形が比較的大きな弾性波速度変化をもたらす機構について, 次のような検討を行った。

その結果, 当発電所のように花崗閃緑岩よりなる塊状, 堅硬で節理を有する岩盤では, 物質中に多数の扁平な回転楕円体の異種物質, たとえば孔隙が分布している場合の弾性係数を求めるものであり, この回転楕円体の形状を無限に扁平と考えた極限が岩盤中の節理の分布を模式化するものと考え, 次に示す式を提案している。

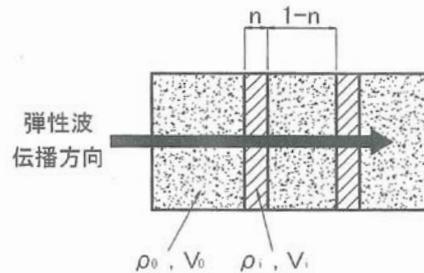


図 4.4 弾性波速度変化のモデル

すなわち, 図 4.4 に示すように, 構成岩石及び節理間隙充填物質 (水, 空気, その他) の密度 (P 波速度) をそれぞれ ρ_0, V_0 および ρ_i, V_i とし, 間隙が全体に占める割合を n とすると

$$\frac{1}{V^2} = \frac{n}{V_i^2} + \frac{1-n}{V_0^2}$$

で表される。この式は力学模型として直列弾性係数に相当するものであるが、Crack Porosity モデルにおいて孔隙の形状を無限に扁平した極限とも一致すると述べている。

ここで、 V_0 で計算に用いた値により計算してみる。

$$\rho_0 = 2.7\text{g/cm}^3 \quad K_w = 2.2 \times 10^6 \text{kN/m}^2$$

$$V_0 = 5.86 \text{km/s} \quad \rho = (1 - n)\rho_0 + n\rho_i$$

また、

$$V_i = \sqrt{\frac{K_i}{\rho_i}} \quad \text{ゆえに} \quad K_i = \rho_i V_i^2$$

であるから K_i/K_w をパラメータとして計算した結果を図 4.5 に示した。

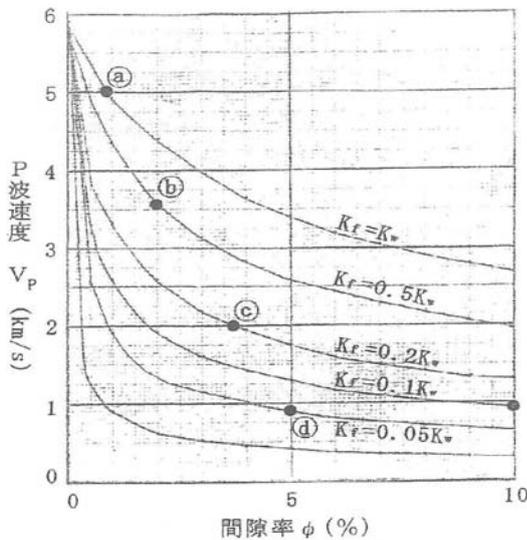


図 4.5 トンネル内 (図 4.2) 速度の解釈

図 4.5 に、図 4.2 で得られたトンネル内速度値 V を入れて、a, b, c, d の記号をつけてみた。

a: $V_4 = 5.0 \text{km/s}$ b: $V_3 = 3.5 \text{km/s}$ $Z_3 = 1.45 \text{m}$

c: $V_2 = 2.0 \text{km/s}$ $Z_2 = 1.52 \text{m}$ d: $V_1 = 0.9 \text{km/s}$

$Z_1 = 0.92 \text{m}$

図 4.4 において、 $K_f = K_s$ は間隙が水で飽和されている場合、 $K_f = 0.5K_w$ は間隙が水と空気よりなる場合である。ここで、 5.0km/s の地山は間隙率 0.8% で間隙は水で飽和されている状態として a の位置にあるとする。この地山がトンネル掘削により、孔奥から切羽にかけて次第に割れ目も多くなり、割れ目には空気も多く含まれるようになると b, c, d となって切羽となると考えられる。このうち d の速度 0.9km/s で厚さ 0.9m の層は発破掘削による損傷域と考えられる。また、速度 2.0km/s と 3.5km/s のそれぞれ厚さ 1.52m 、 1.45m はトンネル掘削に伴うゆるみ領域であって、その厚さからみても弾性領域にあるゆるみ量と想定される。なお、TBM 機械掘削領域では d の速度 0.9km/s のような低速度帯は検出されない。

5. 自然地震動の屈折波解析

人工地震による大深度地下構造調査としては、国際地球内部開発(Upper Mantle Project)による地質構造解析部門として東北大学の依頼により、1966~1967 年に実施した岩手県の焼石岳および宮城県の白石地区がある。これらは何れも測線長 10km 程度で測線両端および測線内の数点に起振点を設けた。その結果は焼石岳では、古生層や花崗岩の露出地域であり、第 1 層 5.0km/s の下位約 1000m が 6.0km/s 、白石地区では、第三記層である第 1 層が 3.2km/s その下位約 1200m が 5.5km/s であった。このように測線長 10km 程度では基盤岩の速度は $5.5 \sim 6.0 \text{km/s}$ であった。次に、1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震について、気象庁の地震月報(平成 7 年 1 月発行)により、日本国内の観測地点で得られた p 波到達時間と、震源からの距離から図 5.1 に示す走時曲線を作成した。ここで、震源の深さ H は、3 地点以上の観測点より求められ $H = 16 \text{km} \pm 2 \text{km}$ とされている。

なお、受震器の設置してあるところは、 6.0km/s より小さい速度層が分布するとして、深度 5km までは 3.0km/s と仮定して計算すると深度は 36km となった。速度 6km/s と 8km/s の境界は、モホ面と称され内陸で深く、太平洋・日本海では浅くなっているといわれている。

また、斉藤正徳先生に、この走時曲線を見ていただいたところ、この走時曲線は気象庁(1990 年)の市川・望月の走時表で、震源の深さ 20km で距離 1500km までの走時と一致しており、この走時表は jeffreys-Bullen を日本向けに改訂したもので、モホ面で $V_p = 7.95 \text{km/s}$ になっているとのことである。

さらに、表俊一郎先生には気象庁の時計の精度が格段に良くなったので、観測値のバラツキが非常に少ないと言われた。毎熊輝記先生は、早稲田大学の学生にどのような走時解析をするか検討するように指示されたと同っている。

6. おわりに

本文は、私が作業中の出来事について検討した結果と、 1500km にわたり観測されている兵庫県南部地震についての走時曲線について私なりの検討を試みたものである。

7. 謝辞

各項目について、ご指導いただいた方々に深く感謝いたします。

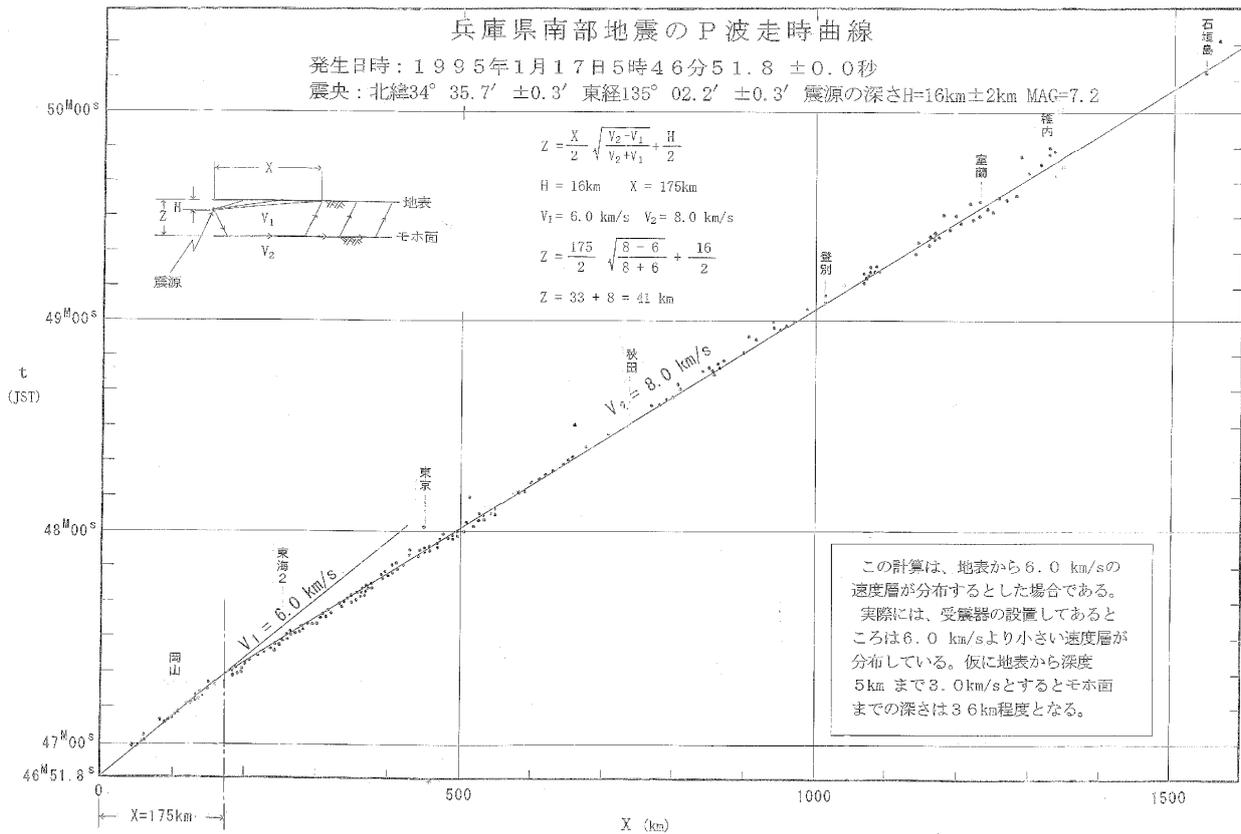


図 5.1 兵庫県南部地震のP波走時曲線

参考文献

- 1) 萩原尊禮, 1938, 基盤面の傾斜が一様でない場合走時曲線解析法, 地震, 10, 463
- 2) 服部保正, 1952, 講座 弾性波探査法(屈折波走時曲線解析法の原理), 地質工学, 第3集, 64-1
- 3) 本莊静光, 本島勲, 1979, 新高瀬川発電所の地下空洞空洞掘削に伴う周辺岩盤の弾性波測度測定, 電力研究所報告, No.38, 14-15
- 4) 市川政治, 望月英志, 1971, 近地地震用走時表について, 気象研究所研究報告, 22, 229-290
- 5) J.B.Walsh, 1968, Attenuation in partially melted material, J.G.R.Vol.73, No.6, 2209~2216.
- 6) J.B.Walsh, 1969, New analysis of attenuation in partially melted rock, J.G.R.Vol.74, No.17, 4333-4337.
- 7) 気象庁, 1997, 地震月報, 平成7年1月, 82-83
- 8) 大見美智人, 岡三治生, 井上正康, 1977, 吸水による岩石中の弾性波伝播速度の変化(第3報)孔隙の形状が縦波伝播速度に及ぼす効果について, 物理探査, Vol.30, No6, 1~9
- 9) 力武常次, 1997, 地球科学ハンドブック, 聖文社, 52-55
- 10) 渡邊貫, 1952, 地質工学発刊の辞, 第1集, 1
- 11) 吉田壽壽, 1976, 不規則な地下構造の解析法についての研究, 地質工学, 第10集, 163-176
- 12) 吉田壽壽, 2010, 山岳トンネル地質調査としての弾性波探査の適用, 物理探査, 63-4, 306-308

C B兵器の歴史的・技術的考察について

草野 晋子¹⁾

1) 日本物理探鑛株式会社 技術顧問

1. はじめに

生物・化学兵器(Chemical, Biological weapon, 以下C B兵器)は,核兵器とともに「大量破壊兵器」あるいは「非人道的兵器」と呼ばれ,冷戦時代には米ソを中心に開発合戦が過熱し,未検証ですが代理戦争と言われる内戦の各地やイラン・イラク戦争で使用されましたが,日本では,話題にされない時代が冷戦中以降も長く続きました.

日本人にとって異次元世界の産物だった化学兵器が一気に身近なものになったのは,1994年6月27日「松本サリン事件」,1995年3月20日「地下鉄サリン事件」でしょう.世界初の化学テロが日本で起きたことによって,自衛隊のなかでも陸上自衛隊の「特殊武器防護」の分野でしか語られなかった「サリン」が連日紙面トップを占める存在に急変しました.事件直後は公共の場のごみ箱が撤去され,電車の網棚に物を置かない時期がありました,事件の年に生まれた世代も成人し,今では過去の話になってしまいました.

海外では,2001年9月11日「アメリカ同時多発テロ事件」,イスラムテロ組織がハイジャックによりアメリカ本土を攻撃する事態の直後,兵器級の炭疽菌がマスコミや行政機関に送られる事件が起こり,生物テロの脅威に世界が震撼しました.その後,テロや事件ではありませんが,SARS,鳥インフルエンザ,最近ではエボラ出血熱の拡散報道が生物兵器の脅威を忘れさせないかのように世界を巡っています.日本でもO-157やデング熱報道など「パンデミック(pandemic,世界流行)」と誤解するような過剰反応でマスコミが大きく取り扱う事態が繰り返されてきました.

このような事態の直後は,新たな脅威に関する知見が様々なメディアで発表され,議論され,管理態勢も改善されますが,暫くすると人々の緊張が解けて話題にならなくなります.

バイオテクノロジーなどの科学技術の進歩とイ

ンターネットなど情報インフラの発達が新たな脅威をより現実的で身近なものにしている昨今,「CB兵器とは何か?どう規制するのか?」という疑問の原点に立ち返るとともに,様々なメディアで公表される情報を元に,C B兵器を歴史的・技術的に考察しました.

2. C B兵器の定義

定義にあたっては,現在,日本を含む多数の国が締結しているC B兵器を規制することを目的とした国際条約に謳われる内容を紹介します.

化学兵器と生物兵器は異なる条約で規制されています.化学兵器は,化学兵器禁止条約(Chemical Weapons Convention: CWC,正式名称は「化学兵器の開発,生産,貯蔵及び使用の禁止並びに廃棄に関する条約」)が,サリンなどの化学兵器の開発,生産,保有などを包括的に禁止し,同時に,第二次世界大戦,あるいはそれ以前の老朽化化学兵器を含むすべての化学兵器を一定期間内(原則として10年以内)に全廃することを定めています.1993年1月13日にパリで署名式が開催され,1997年4月29日発効しました.

本条約第2条「定義及び基準」に「化学兵器」とは,「毒性化学物質及びその前駆物質」(「化学物質に関する附属書」で規定:表1参照)と使用の結果放出されることとなる毒性化学物質の毒性によって死その他の害を引き起こすように設計された「弾薬類及び装置」を組み合わせたものまたは個別にいうとあります.

生物兵器は,1975年に発効した生物兵器禁止条約(Biological Weapons Convention: BWC,「細菌兵器(生物兵器)及び毒素兵器の開発,生産及び貯蔵の禁止並びに廃棄に関する条約」)の第1条が,「防疫の目的,身体防護の目的その他の平和的目的による正当化ができない種類及び量の微生物剤その他の生物剤又はこのような種類及び量の

毒素」,及び「微生物剤その他の生物剤又は毒素を敵対目的のために又は武力紛争において使用するために設計された兵器,装置又は運搬手段」と規定しています。こちらは具体的に生物剤を特定していませんが,2004年WHOが,アメリカの炭疽菌事件を契機に見直した表2に示す微生物11種,毒素6種を生物兵器に使われる恐れのある感染症として発表しています。

表1 化学物質に関する附属書の概要

表1	A	サリン, ソマン, 他
		タブン, 他
		VX, 他
		硫黄マスタード類
		ルイサイト類
		窒素マスタード類
		サキシトキシン
		リシン
B	表1Aの前駆物質	
表2	A	アミトン
		PFIB
		BZ
	B	表2Aの前駆物質
表3	A	ホスゲン
		塩化シアン
		シアン化水素
		クロロピクリン, 他
	B	表3Aの前駆物質

表2 生物兵器に使われる恐れのある感染症

細菌:炭疽, ペスト, 野兔病, ブルセラ病, 鼻疽, 類鼻疽
リケッチア:発疹チフス, Q熱
真菌:コクシジオイデス症
毒素:ボツリヌス, リシン, 黄色ブドウ球菌エンテロトキシンB, アフラトキシン, T2マイコトキシン, サキシトキシン

一般的に,化学剤・生物剤と言われるもの,散布・投射手段,それらを合わせた兵器の形をしているもの三つのタイプすべてが条約ではCB兵器となります。以下については,化学剤・生物剤にあたるCB兵器に注目して述べます。

3. CB兵器の歴史

化学兵器が使用された最古の記録は,紀元前5世紀のギリシャが舞台となったペロポネソス戦争にあります。古代ギリシャでは,銀や鉛の精錬の際に発生する二酸化硫黄が有害で兵器として効果があることに着目し,ナフサ,硫黄,樹脂,松脂,石灰などを混ぜ合わせものを戦いに使用し,後に「ギリシャの火」と呼ばれました。

その後の戦争では,このような火や煙が頻繁に使用されるようになり,十字軍の遠征の際のイスラム軍,15世紀コンスタンチノーブル攻防戦でのビザンチン帝国軍などが戦果を上げています。

生物兵器も,化学兵器と同時期の紀元前4世紀頃,ギリシャ人が動物の死体を敵の水源地に投げ込むことが有効であることを認識しており,ローマ人やペルシャ人が同様の行為を行いました。12世紀,神聖ローマ帝国はイタリア遠征の際に兵士の死体を井戸に投げる戦法をとりました。その結果,ベネチアとジェノヴァの戦いでは伝染病が蔓延し,ベネチア艦隊が撤退しています。14世紀になると,ヨーロッパでペストが大流行し,死体を兵器にする戦法が流行に拍車をかけて敵味方両方に多くの被害が出ました。

ギリシャ時代から続く「ギリシャの火」と死体戦法が大きく変化する契機となったのは産業革命です。18世紀後半から第一次世界大戦までの間に,飛躍的に進んだ民間技術は徐々に軍事転移されました。19世紀末から20世紀初頭のドイツでは発展した有機化学の産物である有毒な化学物質を兵器として開発する動きが起きました。

一方で,1899年第1回万国平和会議で採択された「ハーグ陸戦条約」の第23条に挙げる禁止事項に「毒,または毒を施した兵器の使用」及び「不必要な苦痛を与える兵器,投射物,その他の物質を使用すること」が含まれるなど倫理的な議

論も台頭することとなりました。

研究開発と規制の二つの流れの中、化学兵器が戦争で大規模に使用されたのは、第一次世界大戦でした。フランス軍が使用したクロロアセトンなどのガス弾（催涙剤）を皮切りに、世界最大の化学工業国となったドイツが塩素ガス（窒息剤）で戦果を上げると、両軍ともにホスゲン（窒息剤）や様々な化学物質へとエスカレートしました。1917年、ドイツ軍はイーブルの戦いでマスタード（びらん剤）を使用し、当時は地名にちなんで、「イペリット」と呼称されました。後に、連合軍もマスタードを合成、大戦末期にはルイサイトやアダムサイト（嘔吐剤）が開発されました。現在も高い脅威（化学兵器禁止条約の附属書中の「表1A」）として位置づけられる化学剤の登場に第一次世界大戦時の防護装備では歯が立たず、多くの死傷者を出しました。第一次世界大戦では、窒息剤15種、血液剤3種、びらん剤4種、くしゃみ剤4種、催涙剤12種が使用され、死者約85万人の内、10%を超える約10万人は化学兵器によると言われています。



Bundesarchiv, BArch

図1 西部戦線でドイツ軍の化学弾投射器（迫撃砲を簡易にしたような構造で、敵陣に化学剤を詰めた容器を飛ばしました。1916年）

生物兵器については、第一次世界大戦における

使用記録は取立ててありませんが、18世紀の植民地戦争やアメリカ独立戦争において、それ以前の死体戦法ではなく贈り物などに天然痘を仕込む方法が、主に、感染症の知識や対処手段を持たない先住民に対して用いられました。微生物学の発展とともに、病原体が選別され培養される基礎が築かれ、1796年イギリス人医師ジェンナーによって種痘法が確立されると、使用側は免疫力をつけて被害を受けない態勢を整備できるようになり、近代的兵器としての要件が徐々に整いつつありました。

「化学戦争」と言われた第一次世界大戦を経て1925年、ジュネーブ議定書（正式名称は、「窒息性ガス、毒性ガスまたはこれらに類するガスおよび細菌学的手段の戦争における使用の禁止に関する議定書」）が締結されました。この議定書は、明確に細菌学的手段（生物兵器）の禁止を取り上げた点ではハーグ陸戦条約よりも前進していましたが、生産や保管については触れておらず、開発の流れを止めるには至りませんでした。

ヨーロッパが主戦場となった第一次世界大戦に遅れて化学兵器の研究に取り組むと同時に世界に先駆けて本格的に生物兵器の研究に取り組んだのが日本軍でした。日本はジュネーブ議定書に調印しましたが、批准することなくCB兵器開発を進めました。そして第一次世界大戦後、最大のCB兵器攻撃を実施したという汚点を日中戦争で残すこととなりました。化学兵器は五一六部隊、生物兵器は七三一部隊が専門部隊として関東軍に編制され、新宿にある陸軍軍医学校と連携して満州で人体実験と実戦的使用を行いました。実戦には、化学兵器はびらん剤と嘔吐剤、生物兵器は腸チフス、ペスト、コレラ、炭疽が、主に用いられました。

第二次世界大戦中のヨーロッパ正面のCB兵器の状況については、連合軍（アメリカ）は大量のマスタードを備蓄し、ドイツはタブン、サリン、ソマン（神経剤）を開発し、降伏の時、連合軍によって、ホスゲン、タブン、マスタードの大量保有が確認されていますが、いずれも、使用しないままに終戦を迎えました。

終戦後、日本とドイツのCB兵器に関する資料は戦勝国の手に渡り、米ソ冷戦間に更なる研究開発が進みました。1950年代前半にイギリスの化学メーカーがV剤（神経剤）を開発しました。

投射手段も爆弾や砲弾、航空機からの雨下タンクに加えて、ミサイルなど長距離・高精度・大型化し、いずれの側も報復攻撃のリスクなどから動きのとれない緊張が続くこととなりました。

このような状態から脱する緊張緩和の方策として、生物兵器禁止条約、及び、化学兵器禁止条約が発効しました。冷戦以降は、宗教や民族間で対立する組織・テロリストや条約を批准しない国家などに拡散する流れに変化するとともに、アメリカの炭疽菌事件のように犯罪に使われる事例も発生し、冷戦以前と異なる新たな脅威に曝されることになりました。

以上のように、古代ギリシャの戦いで歴史に登場し、18世紀後半の産業革命に始まる科学技術の発展を変換点として大きく進歩しているという点においてCB兵器の歩みが同じであると言えます。また、CB兵器の使用目的からみると古代ギリシャの戦いから第二次世界大戦まで、直接的に見えないもので奇襲し敵に大きなダメージを与えることを狙いにしており、成功した場合、勝敗を決することに繋がった事例が数多くあります。これらから、大きな流れで捉えた時の時間軸と戦略的な意義においてCB兵器は同じであると言えます。

4. CB兵器の技術面からの考察

これまで別々に扱われることの多かったCB兵器を大きく捉えると開発速度が同じという見方で考察するために、前述の「歴史」では化学兵器と生物兵器を敢えて同じ時間軸で記述しましたが、技術面で、まず、最初に思い浮かぶのは、化学か、生物かで研究開発分野及び有効な投射手段などに差異があることでしょう。戦術的にも、使用後の時間的影響、効果範囲、ダメージの内容がそれぞれ違い、更には被曝側の防護態勢によって被曝後の被害状況にも大きな差があります。

これらを専門的に解説したものは多くあります

が、ここでは「CB兵器は技術面において一体」という視点で考察してみます。

最初に、化学兵器開発の動向をみます。冷戦時代、化学兵器は、材料が揃い一定の技術があれば生産出来ることから「貧者の核兵器」と言われてきました。近年、テロや犯罪などに使用されることへの警戒感が高まっている一因です。図2に、19世紀半ばから冷戦終了までの化学兵器開発の推移を示します。縦軸は半数致死量などを指標とする青酸の毒性を1とした場合の対数表示で、第一次世界大戦以降、致死性化学兵器の毒性が高くなる傾向と非致死性の毒性が弱くなる傾向の二極化の動きが確認できます。CB兵器とともに開発された防護装備品の性能及び投射手段とのバランスを考慮すると半数致死量などの指標で評価される毒性の強さはV剤などの神経剤を頂点として飽和状態にあります。

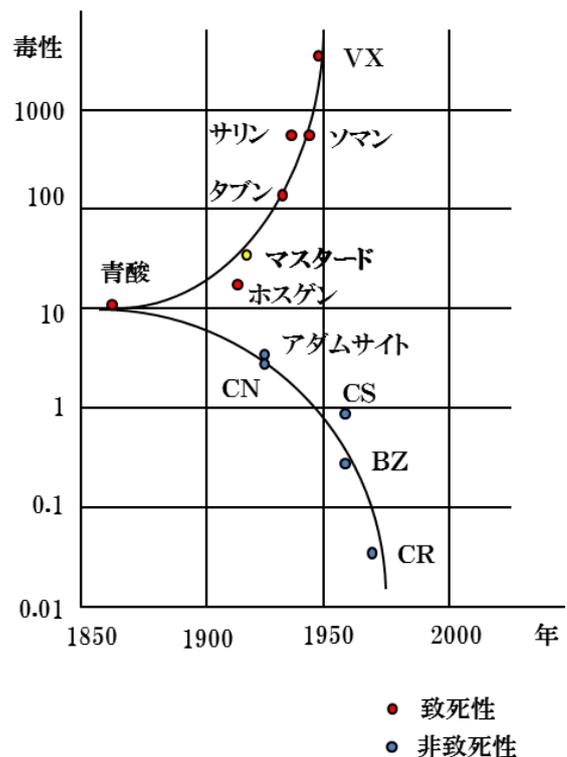


図2 毒性を指標とする化学兵器開発の推移

現在、規制が進み、新たな開発の動きは確認できませんが、水面下では検知・防護手段を無効にする物質や非致死性で痕跡を残さない物質など多

様な方向に向かっているものと思われます。

次に、生物兵器は、遺伝子工学やウイルス学などの進歩からデザインできる可能性が高いと評されることもあります。人がコントロールできるかについては、現状ではかなり疑問があります。

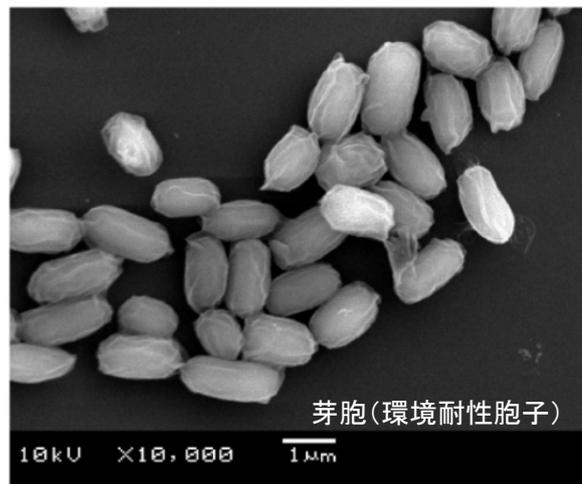
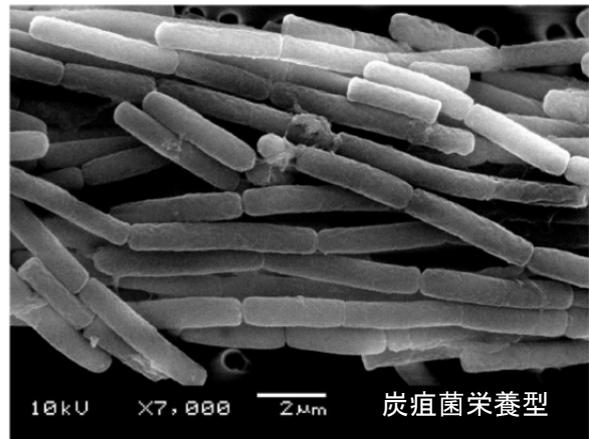
生物兵器として注目されていないものの鳥インフルエンザや SARS, MERS のパンデミック報道に曝される度にその拡散力に驚かされ、これらと例えば天然痘が合わさったキメラウイルスがデザインされたら、最恐の生物兵器が誕生するのではないかという懸念が起きます。2014 年には、ウイルス自体のバイオセーフティレベルは最高でもこれまで地域性が高く兵器使用でなければ脅威は限定的とされていたエボラ出血熱が世界に拡散した事例が発生しました。

第二次世界大戦以降、開発・使用の実績があるにもかかわらず著しい戦果がきかれなかったように、戦場では生物兵器として想定する成果を出せない難しさがある一方で、ウイルスは変異が起こりやすく兵器級でなくても大きな被害をもたらす事例もあります。生物兵器は、SF 映画などで目にするように使用側も想定外の脅威に曝される可能性のある「諸刃の剣」です。

現在、化学兵器と同様な運用手段で拡散でき、化学兵器のように特定の場所、期間だけの効果に限定できるなど比較的コントロールし易いと評価されている生物兵器は図 3 に示す炭疽菌です。傷口や呼吸器から侵入し、感染すると病変部が炭のような黒色に変色することにちなんで名付けられました。

世界中の土壤中に常在する大型細菌である炭疽菌（写真上）は、3 種類の毒素タンパク質（防御抗原、浮腫因子、致死因子）を菌体外に分泌し、これらが宿主の細胞を攻撃して、炭疽菌によって起こる諸症状の直接の原因になっています。生育環境が悪化すると菌体の中央付近に卵円形の芽胞（写真中）を形成します。図 3（写真下）は、家畜やヒトの体内に取り込まれるなどして芽胞から有害な栄養型に発芽している様子です。芽胞は熱や化学物質などに対して非常に高い耐久性を持つ構造体で、ミサイルの弾頭部に搭載して攻撃さ

れる可能性もあり、一度、炭疽菌が形成された環境から菌を完全に除去することは極めて難しいといわれています。



東京都健康安全研究センター病原細菌研究科提供



バイオテロと戦争マルコム・ダンドー へるす出版

図 3 炭疽菌の発芽（写真上）

第二次世界大戦以前から兵器として注目を集めていましたが、冷戦時代のソ連が製造工場の事故で多数の被害者を出し、2001年のアメリカ炭疽菌事件でも使用されました。ただし、ヒトからヒトへの感染は起こらず、世界中に存在する炭疽菌で兵器級として有効なものはごく一部であり、更に人工的に改良された種類に限られます。

最後に、「定義」の表1と表2を比べるとサキシトキシンとリシンが両方で挙げられていることに気がきます。化学兵器は化学物質、生物兵器は生き物というザックリとした分け方では、生物が生産した毒素など化学物質としても扱えるグレーゾーンが存在するのです。

共通に挙げられたサキシトキシンは麻痺性貝毒と呼ばれ、赤潮の原因である渦鞭毛藻が産生する毒素ですが、マガキ、ホタテガイ、ムラサキガイ、アサリなど、主に二枚貝がこれを摂食し、体内に濃縮することによって有毒化されます。症

状は、口唇の知覚麻痺と四肢の弛緩性麻痺が特徴的で、食後30分～1時間後に、口唇・両手足のしびれ感、ピリピリ感が始まり四肢の弛緩性麻痺がみられ、2時間後には呼吸麻痺により死亡することがあります。

米国陸軍が1969年までにサキシトキシンを産生する原生生物 *Alexandrium catenella* の培養に成功し、この毒素を大量に製造・保持していたことをスウェーデンのストックホルム国際平和研究所(SIPRI)が発表しています。最先端の科学技術で、デザインしたアミノ酸を組み合わせたペプチドなど複雑な高分子化合物が人工的に生産できるようになっていることを考慮すると、これまでの培養・抽出製法から合成法での生産に変化する可能性もあります。

兵器の使用法としては、毒素を含む貝を直接媒介とする方法に加えて、生成した毒素を化学兵器的手法で直接的に投与することもできます。

表3 CB兵器の分類 vs 禁止条約

古典的 化学兵器	工業物質 ・薬品 他	生体制御作用 ペプチド	毒 素	遺伝子改変 生物兵器	古典的 生物兵器
(例) シアン化合物 ホスゲン マスタード 神経剤	エアロゾル 様新物質	サブスタンスP ニューロキニンA	サキシトキシン リシン ボツリヌス毒素	改変または テラーメイドの細菌・ ウイルス	細菌 ウイルス リケッチア 炭疽菌 ペスト菌 野兔病菌
		【感染力無】		【感染力有】	
← 化学兵器禁止条約 (CWC) 規制範囲 →				← 生物兵器禁止条約 (BTWC) 規制範囲 →	

神経系や内分泌系をはじめとして各器官や組織に内在する自律性など体の内部に自然にそなわっている働き(生体の調節)を人為的に外部から生体にある作用を与えて制御するもので、アミノ酸とアミノ酸がペプチド結合(-CONH-)して、2個以上つながった構造のものを『ペプチド』といいます。

以上のように、C B兵器の使用は様々な面でハードルが上がっている一方で、新たな脅威出現の可能性は未知数です。このような状況を整理して、対象となるC B兵器と禁止条約の関係を示したのが表3です。左右両端列の「古典的」と表現したジャンルに分類するのは主に第二次世界大戦終了時までにはC B兵器として存在していたもので、その中間列は、近年、注目されるようになった代表的名称を用いて、新たな脅威と思われるものを仮置きした区分です。C B兵器の両禁止条約が重複する領域を含む中間列も、今後更に生み出される脅威を反映して枠組み変更の余地があることから、「一体」とは言え、表3も過渡期的なものであると言わざるをえません。

5. おわりに

C B兵器の経緯と現状について簡単に紹介し、C B兵器を歴史的及び技術的な面から類似・一体化して捉えられる面を考察しました。今後、拡散が予想されるC B兵器については、奇襲を受けないための備えが必要で、日本でも防衛省だけでなく様々な組織が平素から防護態勢作りに取り組んでいます。

日本物理探鑛株式会社は不発弾等危険物の調査を行います。この中に、戦争が生み出した負の遺産である老朽化化学兵器が含まれます。

第二次世界大戦期に製造された不発弾及び老朽化化学兵器を扱う業務で使用する防護・検知製品もC B兵器の進化及び科学技術の進歩に伴って同時並行的に開発され、主に軍事分野で製品化されてきました。私たちはこれらを正しく使用する訓練と培った技術によって安全管理を行っています。より高性能、小型・軽量化、高い操作性などとニーズに対応する防護装備品市場を適切に評価・導入し、正しい知識と技術で安全な社会の発展に貢献してまいりたいと思います。



図4 A事案地区の土地改変時の安全確認調査

参考文献

- 井上尚英, 2008, 図解雑学, 生物・化学兵器, ナツメ社, pp.223
 マルコム・ダンドー, 2011, バイオテロと戦争, へるす出版, pp.202

埋没鉄類探査を目的としたフラックスゲート磁力計システムの開発

中塚 正¹⁾・鶴川 英明²⁾・浦野 草平²⁾・高橋 正容²⁾・吉田 武志³⁾

- 1) 技術顧問
- 2) 機械開発部
- 3) 技術本部

1. はじめに

埋没鉄類磁気探査の概要については、さきに物理探査学会の情報誌「物理探査ニュース」にも紹介しました(中塚, 2013)。我が国では、戦後復興に向けて不発爆弾をはじめとする危険物探査を契機に発展してきました。近年は、都市部の地下工事の増加を背景にして、探査対象物が危険物だけでなく、埋設管や鋼矢板・各種基礎杭などの埋設物にも適用されるようになっていきます。近日、基礎杭設置にあたりデータ偽装のあった問題が話題になっていますが、そうした問題の実情を正しく把握するために、適用できる技術の一つでもあります。

探査の対象は市街地である場合が多く、直流電車軌道からの漏洩電流・既存構造物や廃棄物の存在・大型車両などの走行といったノイズ環境のもとで、対象物の精度良い探索・評価が求められています。

技術的には、火山や地質構造の調査と異なり、対象が強磁性体であるという特色があります。埋没鉄類には磁性体の形状に応じて消磁力が働き、その長手方向の両端付近に正負の磁極を生ずるモデルを想定して解析されます。つまり、磁荷分布を1次のモーメントまで評価するわけです。

実際の探査での測定作業では、地表測線またはボーリング孔に沿った連続測定が行われます。先に述べたように都市域でのノイズ環境に打ち勝って正しい探査結果を得るためには、異常ソースに近づいて計測を行うことが必要になります。磁極のソースによる磁気異常は、よく知られているように磁気モーメントを想定すれば、距離の3乗に反比例して減衰します。距離が2倍になればその信号が1桁近く減衰するわけです。また、測線調査を行っている間に磁場が時間変化すると、その分だけ異常体の影響を判定する上で不確定を生むこととなります。これは、とくに都市部で多い直流電車の漏洩電流の影響が大きく、相当離れた位置を大型車両等が移動する場合でも問題になります。

というわけで、とくに都市域での磁場計測においては、磁力計の種別にかかわらず、2台の測定器を一定距離(1~2m程度以下)離して同時測定

の差分を記録する傾度測定が行われます。これは、地質的な対象の磁気探査で行われる定点地磁気観測を用いた日変化補正の考え方と似ていますが、2台の測定器のうちその一方に大きく影響を及ぼす種類の環境ノイズが問題となり、埋没鉄類探査では、2台の測定器を1本のツールに固定して傾度(差分)測定の間をとるのが一般的です。そのとき、2台の測定器はともに異常体ソースの影響を受けることとなり、ソースまでの距離に応じて実態に適合した解析手順をとる必要があります。

さて、弊社では探査に用いる磁力計として伝統的に誘導コイル型磁気傾度計を多用してきました。これは主として耐ノイズ環境の性能が評価されたためと思われませんが、面的な調査においても測線データ(プロファイル)に対して異常パターンの認定(異常物直近で測定値がベースライン=0を横切る)とその図学的解析法を用いた個別異常ソースのパラメータ推定を行うこととなります。測定データの意味を理解する上で直接的でないため、素人判りしやすくありません。調査の遂行において、測定データの意味するところを発注者が正しく理解することは、危険の可能性を払うために作業を追加するなどの判断をする上では極めて重要です。この点で、鉛直差動フラックスゲート磁力計によるマッピングでは、測定データから直接的に異常値の平面分布が導かれ、カラー段彩図として表示するなど見た目にも説得力のある結果が得られる利点があります。(誘導コイル傾度計のデータを、「単コイル変換」と呼んでいる数値処理によりマッピングに適したデータに変換する方法も開発していますが、生のデータではなく、移動速度一定などの仮定が必要となるなどの弱点はあります。)

そのような背景もあって、弊社でも1990年代から差動フラックスゲート磁力計の開発をすすめ、調査への実用化を行ってきました。誘導コイル型磁気傾度計は、測定原理が単純でセンサ部構造および電子回路も単純であるため、測定装置としての精度低下や不安定を招く要因が少ないという利点がありました。差動フラックスゲート磁力計では、そうした精度低下や故障への対応が必要となり、測定装置の改良や検査・調整方法の向上を

図などの開発を進めています。

本稿では、差動フラックスゲート磁力計システムの開発に関する取組みの中から、近年の開発で遭遇したいくつかの技術的視点について述べてみたいと思います。

2. 埋没鉄類探査に用いる磁力計

地球磁場の変化を測定する磁力計として、様々の種類が知られている。測定分解能の高さだけに注目すると、全磁力を測定する光ポンピング磁力計やプロトン磁力計（オーバハウザ磁力計はその一種）が高性能であるが、価格の面を差し置いても、両者とも地表・地中では磁気傾度の影響で正常に動作できないことが多い。とくに危険物探査では、プロトン磁力計は磁気地雷を作動させてしまう恐れがある。また、超高感度で知られる超伝導磁力計（SQUID：超伝導量子干渉計）は、価格面・小型軽量の面で野外測定の実現が困難な状況にある。

それらの磁力計を除くと、1nTレベルの精度で磁場の連続測定に適するものとしては、フラックスゲート磁力計と磁気インピーダンス磁力計（MIセンサ）が利用可能であろう。埋没鉄類探査に用いる磁力計としては、先に述べたノイズ環境の問題から、0.1nT以下のような高感度は一般に必要とは言えない。むしろ、目指す計測を安定かつ的確に制御できるシステムを組み上げることが重要である。

そこで、すでに開発経験を持つフラックスゲート磁力計によるシステムの改良・再構築を目指して開発を進めた。

3. フラックスゲート磁力計の動作原理

フラックスゲート磁力計は、磁化飽和特性を有する磁性材料を磁心に用いたコイルに交流電流を流し、磁心に生ずる磁束変化の特性を利用する。外部磁場がない状態で正弦波電流を流すと、磁心の飽和特性のために、磁束変化波形は図1実線のように、正弦波をクリッピングした（正負に均等な）矩形波に近い波形になる。ここでコイル軸方向に磁場が存在する場合を考えると、クリッピングの発生するタイミングがずれるため、図1破線のように磁束変化波形は正側と負側で不均等な形となる。正負均等な矩形波は、基本周波数と奇数次の高調波成分からなるが、不均等の矩形波は偶数次の高調波成分を含むので、2次高調波成分を計測することによりコイル軸方向の磁場強度を知ることができる（中塚ほか、1999）。

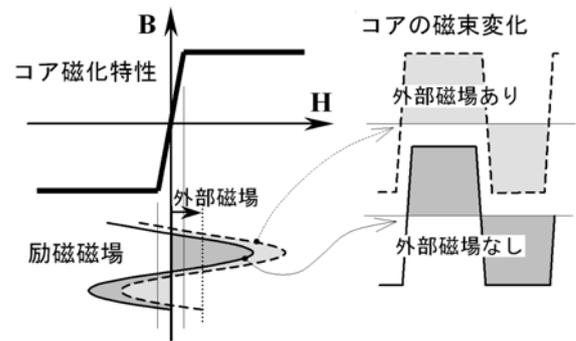


図 1 フラックスゲート磁力計の原理(1 次コイルの役割)

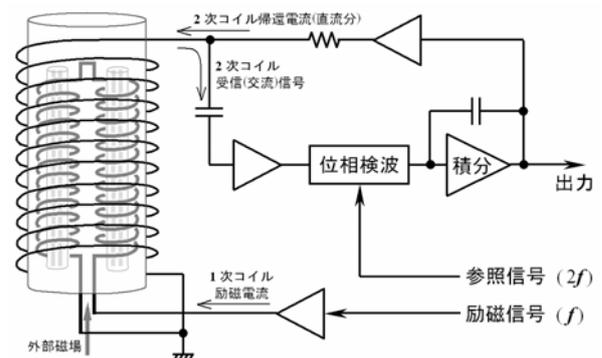


図 2 実用フラックスゲート磁力計の回路ブロック図

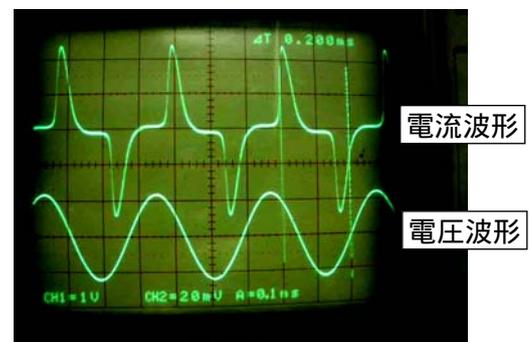


図 3 現実の 1 次コイル電流波形

その原理を用いて設計したフラックスゲート磁力計の回路構成例が図2である。外部から加わった軸方向の磁場の効果を励磁(1次)信号の倍周波数の位相検波で検出し、積分器を通して外部磁場を打ち消すように2次コイルに帰還電流を流す。この帰還電流が外部磁場をちょうど打ち消す状態になれば、位相検波出力=積分器入力=0となり、積分回路の出力を保持する。このサーボ機構により、積分器の出力は2次コイルへの帰還電流に比例し、外部磁場の変動に追従することになる。

しかし、以上の説明は原理説明のための理想論である。図1では励磁磁場を正弦波で示しており、そのためには1次コイルに正弦波電流を流す必要があるが、磁性材料の磁心に巻かれた1次コイル

で電流を制御するのは現実的でなく、実際には1次コイルに正弦波電圧をかけている。実際に1次コイルに流れる電流を計測したオシロスコープ画面を図3に示す。画面下段は1次コイルへの供給電圧(±約1.25V)を示し、上段が実際の電流波形である。電圧の正弦波形は、上向ゼロクロスから1/4周期進んだところで+のピーク、3/4周期進んだところで-のピークを迎えるが、この例の電流波形では電圧波形に対し概ね3/8および7/8周期のところプラスおよびマイナスのピークを示している。位相に遅れを生ずることは、インダクタンスをもつコイルに交流電圧をかけた場合の一般的な特性であるが、インダクタンスが一定値の単純なコイルの場合と違って、この場合、電流波形が正弦波形から大きくずれたものになっている。これは、この1サイクルの間に1次コイル磁心の磁束が正弦波的不是な変化をしたことを示しており、図1で矩形波的变化をすることを考えたことに符合する。

つまり、概略的には図3の電流波形が+ / - に大きく振れる位置で、図1の磁束変化の - から + / + から - への移行が行われていると読みとれる。

4. 探査に用いるツールへの設置と軸合せ調整

4.1 軸合せ調整の重要性

探査においては、前記のように傾度測定を用いるため、そのツールは一般に筒状をしており、ツールの両端付近に2つのセンサを配置して両センサの差分測定を行う。そのセンサは特定方向の成分測定を行うものであり、両センサの計測軸を正確に合わせおく必要がある。

長さ(距離)を合わせるのであれば、1m長で0.1mm未満の誤差で合わせれば、1万分の1の精度が確保できる。軸方向の1万分の1精度とは、方向を 10^{-4} radian (= 20秒角) 未満の誤差に押さえることを意味する。

例えば、日本付近を想定して地球磁場の磁北方向成分と鉛直成分がともに3万nT程度と考え、感度(ゲイン)が十分正確に調整されているセンサを用いて鉛直磁場を3nTの精度で測定しようとしたとき、そのセンサ軸が磁北方向(またはその反対方向)へ傾くことを許容される角度範囲は、角度20秒以内である。

角度誤差が20秒以内とは、長さが10cm程度のセンサユニットをツールに固定する際に、一端を完全に固定できたとして、他端を長手方向と直交する2方向に対して、10 μ m以下の誤差範囲内で、しかも2方向同時に調整・固定することを意味し、大きな困難を克服する必要がある。

ここで上に『両センサの計測軸を正確に合わせ...』と書いたのは、2つのセンサが1つのツール内にきちり固定された傾度計で、両センサ相互の軸方向が正しく調整されたものであれば、大局的な地球磁場によるツールの揺れ角の影響は両センサ間でキャンセルされ、探査対象の異常場を表現する差分出力には現れないからである。一方、傾度測定でない例えば3軸単体磁力計を用いた探査を行おうとしても、磁力計の姿勢をこの精度で維持して移動測定を行うことは全く不可能である。3軸単体磁力計は、精度・調整の観点からして2重に非現実的であることが、先の議論から容易に理解される。

なお、正確に軸合せされたツールが揺れ動いたときに探査対象の異常に対する応答については、(鉛直成分計測の場合)対象物が測定位置直下にある場合に誤差が小さく、横方向に離れるに従って誤差を生みやすくなるが、最悪でも対象物方向(伏角)が揺れ角の分だけ異なったことによる効果に等しく、とくに大きな揺れでない限り、探査結果に大きな影響は与えない。

従来型の差動フラックスゲート磁力計では、機械的な軸合せの仕組みを用いて細心の調整を行った後に、揺れによる誤差が大きくなりやすい方位をツールごとに計測してマーキングを施し、実地調査にあたっては、ツールの移動方法に応じて揺れの発生しやすい方向があるので、その方向を避けてツール回転角を設定する操作を行っている。

しかし、この調整作業は、作業場所の磁気環境の影響を受け作業自体がメカニカルな調整の試行錯誤になるのに加えて、調整状況が経年的に変化する状況も見られる。そこで現在開発中のフラックスゲートセンサでは、調整の方法を根本的に見直し、交差磁場を補助センサで計測して、その出力を用いた電氣的調整を行う技術開発を行っている。

4.2 交差磁場センサによる電氣的調整法

この電氣的調整法とは、主フラックスゲートセンサの計測軸が、目的の軸方向からある誤差をもつ状況のとき、その軸をメカニカルに調整するのではなく、目的軸に交差する2軸方向の磁場を補助センサで計測し、その微小割合をもとの測定量に加減することにより、等価的に目的の軸方向の計測値に変換するものである。

今、磁場の目的計測軸方向成分を Z 、それに直交する2軸方向成分を X, Y とし、主センサ・交差軸補助センサが微小な方向の誤差のため、 Z_m, X_m, Y_m で表されるとすると、微小量 α, β, γ と $\cos(\text{微小角})=1$ の近似[微小量の2次の項を無視するこ

とに相当] を用いて,

$$\begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_1 & \alpha_2 \\ \beta_2 & 1 & \beta_1 \\ \gamma_1 & \gamma_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

と一般的に表現され, これよりZは,

$$Z = \frac{(1 - \alpha_1\beta_2)Z_m - (\gamma_1 - \beta_2\gamma_2)X_m - (\gamma_2 - \alpha_1\gamma_1)Y_m}{(1 - \alpha_1\beta_2 - \gamma_1\alpha_2 - \beta_1\gamma_2 + \alpha_1\beta_1\gamma_1 + \alpha_2\beta_2\gamma_2)}$$

微小量の2次以上の項を除けば,

$$Z = Z_m - \gamma_1 X_m - \gamma_2 Y_m$$

となる. すなわち, Z_m に X_m, Y_m による適切な補正を加えればよい.

傾度測定ツールにおいては, 2つの主センサのそれぞれに対して, この補正を行うことが必要であり, 原理的には交差軸補助センサが4つ必要になる. しかし, 実際の測定において主センサごとに別の補助センサが必要になるのは, とくに大きな異常場が存在する場合であり, その場合には交差軸補助センサによる補正の有無が探査結果に殆ど影響を与えないと考えられる.

交差軸補助センサを2つだけ使用して, 2つの主センサの補正を行うためには, 図4のような回路で実現できる. 傾度出力を得るために, この回路の後に差分の演算回路が必要となる.

ハードウェアによる信号演算によらずに, デジタルデータ収録の後に, 表示・解析の処理の一環としてその演算を行うことも可能であるが, 現地作業でのデータの品質管理の意味で補正処理結果がリアルタイムで確認できることが有利であろう.

4.3 センサのツール内設置の前後の各種調整

上記の軸合せ調整は, センサのツール内への実装を行ってはじめて作業が可能となる. 一方, センサの磁力計としての感度の調整 (キャリブレーション) も重要であり, 基本的な感度 (ゲイン) はセンサ本体と制御回路の組で決まるものである. その後, ツール内へ実装に付随して微妙な特性の変化がないとは言えず, その分は実装後の微調整が可能ないように設計している. ツール内には, センサ1次コイル磁心を除き磁性材料を一切使用しないが, 制御回路に流れる電流の低周波~直流分がつくるわずかな磁場と構成材料がもつ弱い常磁性の影響で, 2つのセンサが影響を受ける可能性が残るためである.

各センサ感度の微調節とともに重要なファクターとして, 2つのセンサの感度を揃えることが必須である. 先に軸合せ調整の重要性でもふれたように, 探査の移動測定においてツール系が地球磁場に対する若干の揺れを排除することは, 事実

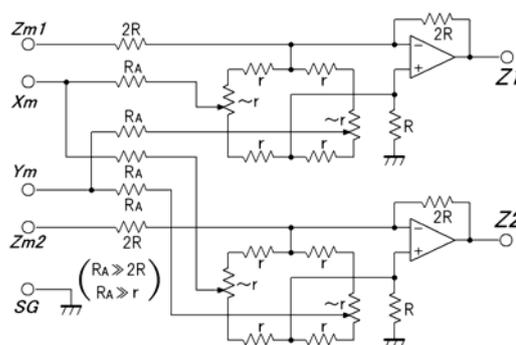


図4 補助センサによる電氣的軸合せの回路

上不可能であり, 個別のセンサはその揺れに対応した軸方向成分の変動を検知し, 両センサの変化の差分を傾度測定の出力としている. そのとき, 両センサの軸合せが正確に行われていても, もし両センサに感度の差があれば, ツールの傾斜状況を示す変動パターンが差分出力に混入することとなる.

従って, 差動フラックスゲート磁力計システムの各種調整作業の手順としては, 1) 各センサ単体の基本ゲイン調整を行った後に, 各センサのツールへの実装を行い, 両センサに対する 2) 電氣的軸合せ調整と, 3) ゲインバランス微調整を行うこととなる.

5. フラックスゲートセンサの各種調整の方法

5.1 各センサ単体の基本ゲイン調整

実探査から得られるデータを解析して, 想定される異常体の評価を行うには, 定量的な裏づけのあるデータを取得しておくことが重要である. 現実には, 異常体の特性により出現する磁気異常はその大きさが 10 倍・100 倍とオーダーで変化することが珍しくないので, センサのゲインが 1 割異なっても結果に及ぼす影響がほとんどない場合もある. しかし, 何かの必要があって追加調査や, 経年的な変動を調べるために, 過去のデータの詳細を定量的に見直すこともあり得る. そのときに, 過去の取得データの定量的な信頼性が劣ると, 正しい結論を導けない恐れもある. 計測器が正しくキャリブレーションされていることは, 計測器としての信頼性の指標として重要な一項目である.

このゲイン調整は, 本質的にセンサ自体と制御回路の組に特有なものであり, センサをツール内に設置する前に調整する. 但し, ツール内への実装に付随して微妙な特性の変化がないとは言えず, その分は実装後のゲインバランス調整の一環で微調整が可能ないように設計している. 現状では, ツール内への実装の後には基本ゲイン調整が行えない構成になっており, 後記のように「ゲイン

「バランス微調整」では、微調整を効果的にするため、調整可能範囲を狭く（1%未満に）取っているため、最悪でもバランス調整を含めてその範囲内に収まるレベルへの調整を終えておく必要がある。

センサの基本ゲイン調整は、外部からの磁気擾乱がシールドされた場で、既知強度の適切な直流磁場にセンサを置いて調整を行えば申し分ないが、とくに市街地ではその実現は困難である。実際には、ヘルムホルツコイルで1Hz以下の交流磁場を発生させ、ヘルムホルツコイル中心に設置したセンサからの出力をロックインアンプ（NF回路設計ブロック, 2009）に入力し、発生磁場の周波数と同期した成分の振幅を計測して、調整作業を行っている（図5）。

ここで、ヘルムホルツコイルで生成する磁場は、給電回路のモニタ電流値に対応した正しい強度になっていることを、定期的に標準磁力計で検定してあることが前提となるが、都内の弊社開発室の環境でも、直近道路を通過する車両の影響と直流電車の漏洩電流と思しき変動等がない時間帯を選べば、0.1%前後の精度の調整が行える。

ここで重要なことは、ヘルムホルツコイルといえども生成される磁場の一様性は完全ではないので、調整すべきセンサをコイルの中心位置にその機能軸方向を合わせて、慎重に設置することが重要である。参考として、ヘルムホルツコイル（ウィキペディア, 2014）の理論特性を付録に掲げている。また、磁場の一様性をより向上したければ、ヘルムホルツコイルのサイズをより大きくするか、アレイ化したより複雑な構成のコイルシステム（例えば、マクスウェルコイル（Wikipedia, 2015））の導入も考えられる。

5.2 電気的軸合せ調整

埋没鉄類探査を目的とした差動フラックスゲート磁力計において、その両センサの計測軸を精密に合致させることの重要性と、それを補助センサによる交差磁場測定を用いて電気的に調整する方法の概要についてはすでに述べた。

この電気的軸合せ調整を、現実に各種ノイズの状況が理想的でない環境においても実行できるよう、実用性のある方法を検討した。その方法には別の見地からは、同等の性能やもっと効果的な方法があるかも知れないが、我々が検討・実践してきた一つの方法を紹介する。なお、ここでは、長手方向のツール軸が、主センサの意図した計測軸に一致し、2つのセンサがこの軸の両端付近に設置されているものを想定している。

センサの軸合せをするということは、その軸ズレ状況を把握することが主要な課題であり、2つ

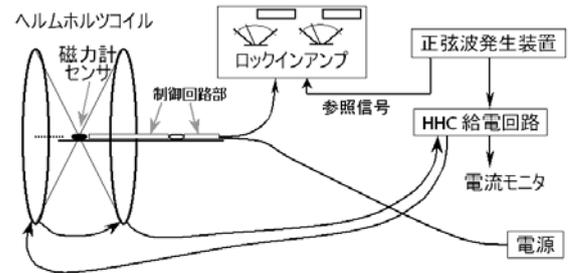


図5 ヘルムホルツコイルを用いた交流磁場による磁気センサの基本ゲイン調整

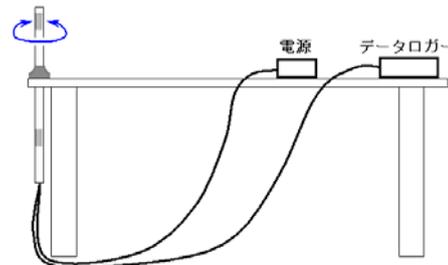


図6 ツール内2センサーの軸ズレ計測作業

のセンサを含むツールの範囲に一樣な磁場をかける必要がある。ツールのサイズは一般に長さ1m前後となり、人工的な磁場で実現するのはきわめて困難と言える。例えば、ヘルムホルツコイルで一様とみなせる範囲が1mにするにはコイル半径が数10mでも足りない。また、両センサ位置に絞って同等の磁場を発生させようとして2つの装置を用意しても、その設置位置・傾斜等を一般に1万分の1未満の誤差範囲内に厳密に調整することは、至難の技となる。そこで、人工磁場は大きな軸ズレの概略調整に利用し、最終調整は、ローカルな磁気異常や人工ノイズが十分小さい条件で天然の地球磁場を用いることとした。

図6は、この軸ズレ計測の作業の概観を示している。計測を行いながら鉛直に保持したツールを軸周りに360度回転させ、続いて360度逆回転させる方法をとっている。幸いにして日本付近では地球磁場の伏角が45度前後の適度な水平成分があるので、360度回転の間にツール軸に直交する磁場が軸の周りを1周することになる。各センサ2回目の回転が逆回転なのは、作業の繰り返しによって接続ケーブルの捩れが蓄積しないためである。鉛直軸周りの回転は、軸の振れによる再現性不良を起こしにくいと考えて採用しているが、場合によっては軸方向への移動が抑制できる状態で水平台などを用いることも可能であろう。

ここに、複数回の回転が重要な意味を持つ。もし、2回の回転で計測波形が異なることがあったら、ツール軸の振れがあってその状態が2回で同期していなかった場合も考えられるが、この作業場所のノイズ環境（直流電車からの漏洩電流などの問

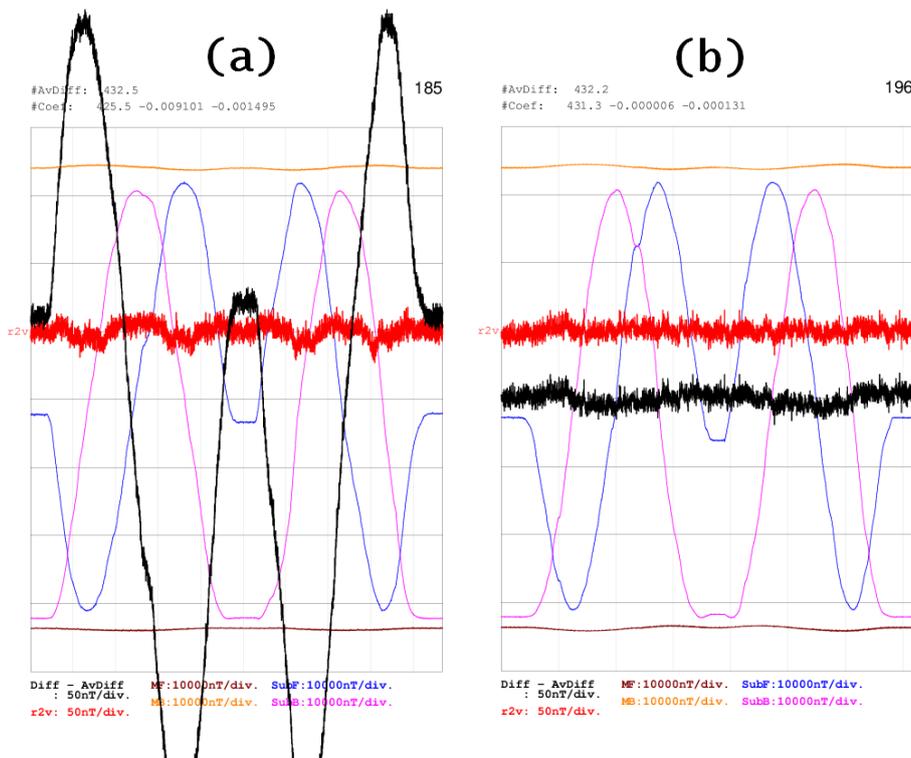


図7 電気的軸合せ作業における軸ズレ検出データ例
(a) 初期状態 と (b) 調整が進んだ段階

題)で磁場が時間的に変動した可能性もある。何度かの繰返しで安定した波形が計測される状況になれば、信頼に値する結果と見てよい。

図7は、そのような計測データを整理したものの2例である。左 (a) は、調整作業の開始時の計測結果 (横軸は時間、前半に正回転・後半に逆回転) であり、図の差分出力を示す黒線が大きく変動している。同図には2つの交差磁場計測の補助センサのデータが青と紫で示されており (縦スケールは200倍異なる)、この場合では、青のグラフに相当する成分を反転したものが黒波形に大きく混入している状況を示している。従って、この段階では、補助センサ青の出力が差分出力に加算されるように、電気的調整を行うことになる。そのような調整を何度か繰返して調整がある程度進んだ状態が、右 (b) である。差分出力の黒グラフが先と比べて大きく改善されたことが見て取れる。ここに、(a) (b) とも赤で示したグラフは、それぞれのデータに関し、青・紫の補助センサ成分による加減を最適にできたときに予定される差分出力を数値化したもの (最小二乗法) のグラフを示しており、回転動作でツール軸の振れを生じたり、作業中に磁場ノイズ環境が変化した場合には、平坦ではないグラフが表示されることとなる。なお、この右図 (b) の作業の際には、たまたま回転動作がスムーズでなく、青と紫のカーブにゆがみを生じているが、この作業による判定には影響していない。

5.3 2つのセンサ間のゲインバランス微調整

前節の電気的軸合せ調整作業で、ツールを同じ位置でその軸周りにのみ回転させているのには、わけがある。前章で述べたように、センサの感度 (ゲイン) を精密に合わせることが容易ではなく、その段階ではゲイン調整が不完全なためである。その状態でツール軸を揺らす形の運動を行うと、地球磁場に対する角度が変動し、前記のように単純な作業手順では調整作業が機能しなくなる。

つまり、前節の調整では、2つの主センサの感度の微妙な差 (ゲインバランス) が差分出力のオフセット分として現われ、アナログ電子回路が宿命的にもつオフセット特性との切り分けが困難である。しかし、このゲインバランスが調整されていない状態では、現実の移動測定では避けきれないツールの揺れ (地球磁場に対する角度の変動) により、差分出力が大きく乱されることになる。

このゲインバランスの微調節に必要なデータを取得するためには、先に触れたように人工磁場を発生する方法では限界があり、静的な地球磁場の中でツールの向き (地球磁場に対する角度) を変動させつつ、つまり大きく揺らしながらデータを取得する。このとき、前の軸合わせ調整が完璧に行われていれば、差分出力に現われる変動は、ゲインバランスのズレの分だけになる筈であるが、現実には軸合わせ調整の残留分が、取得データに影響する。

現状としては、軸合せズレの影響をなるべく小さい状態でゲインバランスのズレの影響が大きくなるようなツールの揺らし方として、「北上往復テスト」(図8) と称する運動を取り入れている。それは、腕を伸ばした手でツールを保持して 水平北向きと鉛直上向きの間で何回か往復させる動作で、それをツールの軸周り回転角が 90度異なる状態で2動作行う。これによって、補助センサによる軸ズレ調整効果が正逆のものを加算して、その影響がなるべく相殺されるように配慮した。

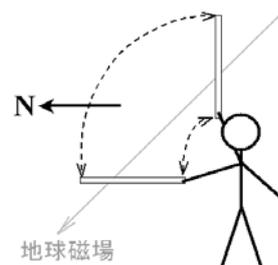


図 8 ゲインバランス微調整作業におけるゲイン差検出のための「北上往復テスト」

図9は、そのような計測データを整理したものの2例である。左 (a) は、この調整作業の開始時の計測結果 (横軸は時間、前半と後半で軸周り回転角が約 90度異なる) であり、図の差分出力を示す黒グラフの変動の主要な部分が、茶色のグラフで示された一方のセンサFのデータ (他方センサBは感知軸が反転しているので、その橙色グラフを上下反転したものに相当する) と同相で変化している。従って、この段階では、センサFのゲインがセンサBのゲインを上回っていることを示している。この状態に対するゲインバランス微調整を何度か繰返した後に得られた同様の結果が、右 (b) である。差分出力の黒グラフの変動が大きく改善されたとは言えないが、(b) の左半と右半で茶色のグラフとの位相関係が反転したことがわかる。数値データの上でも (a) で 0.17% 程度あったゲインバランスのズレに相当する量が、(b)

では 0.002%程度まで低下しており、少なくとも左半と右半との平均で見れば、ゲインバランスのズレは 0 に近づいたと言えるであろう。なお、(a) (b) とともに赤で示したグラフは、それぞれのデータに関し、前節と同様の処理によって、ゲインバランス調整を最適にできたときに予定される差分出力のグラフを示している。とくに、(b) で黒と赤のグラフがよく似る状況は、ゲインバランス調整が十分良く調整されたことを示すと考えられ、軸合わせ調整の残留分と、上記のような調整では手に負えないアナログ回路の非線形特性成分が残っているものと考えられる。

6. おわりに

上の議論では述べなかったが、軸合せ調整でもゲインバランス調整でも、2つのセンサのどちらかを調整するかの自由度がある。現状のリアルタイ

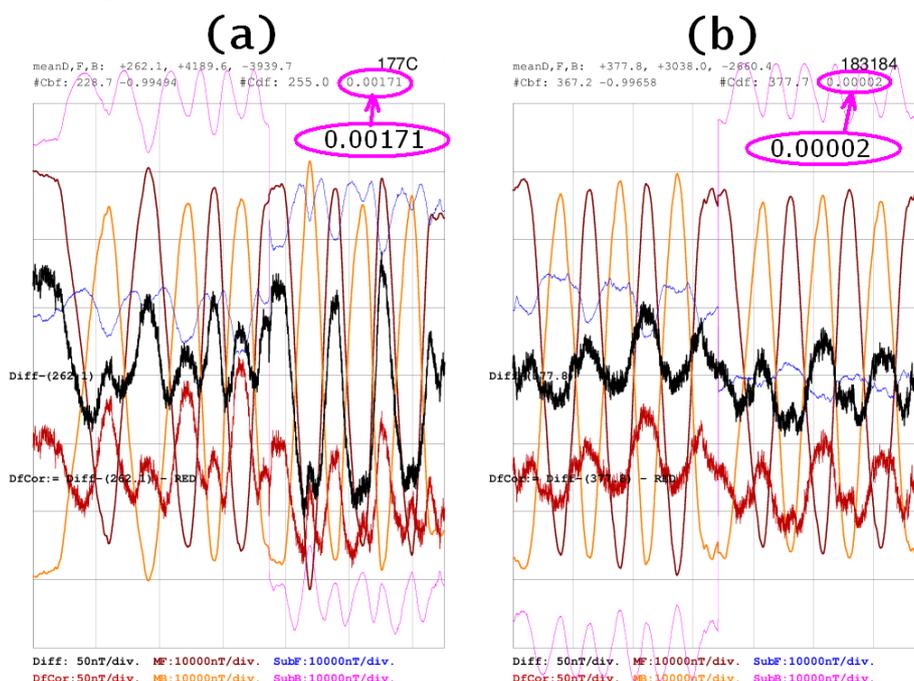


図 9 ゲインバランス微調整作業におけるゲイン差検出データ例(a) 初期状態 と (b) 調整が進んだ段階

調整作業では、データ収録画面でどちら側を調整すべきかを判断できる状況を実現していないため任意の側のセンサの調整を行っているが、軸合せ調整の方は収録データの簡単な処理でその指標を出力できるので、改善を図りたいと考えている。しかし、ゲインバランス調整の方は、磁場の絶対値を必要な精度で測定する光ポンピング磁力計などを利用した高度な計測環境と、ツール軸をその全磁力方向に合わせる負担の大きい作業が予想され、困難であろう。そこまでのことをせずとも、ゲイン（感度）そのものを0.1%レベルに調整できれば、数100nTの振幅を有する磁気異常を1nT未満の誤差で計測できるので、都市域における環境ノイズに比して十分な性能と言える。

ここまで、ツール内に設置した2つのフラックスゲートセンサの軸合せ調整と両センサのゲインバランス調整の方法について述べたが、両者を純粹に分離して調整できる状況にはなっておらず、両者の調整を交互に行って誤差を収束させていくことが必要な状況である。また、現状のゲインバランス調整方法は、再現性をみる上で必ずしも十分な方法ではなく、より良い操作方法あるいは補助装置の導入を考えたい。

また、軸合せ調整とゲインバランス調整は、本質的には別の要因で必要だが、原理的に分離して調整を行えるのが望ましい。現状では、ゲインバランスの影響のみを簡便に抽出する方法のアイデアがないのが実情であるが、今後の研究開発の課題としたい。

[付録] ヘルムホルツコイル内部の磁場精度 (理論値)

ヘルムホルツコイルによる人工磁場を利用して磁力計のキャリブレーション等を行う際には、コイル内の磁場の一様性がどの範囲でどの程度確保されているかを正しく理解しておく必要がある。ここでは、理想的なヘルムホルツコイル内の磁場がどのような分布を示すかを計算し、資料として残しておく。

ヘルムホルツコイルとは、等しい半径 a の円形コイルを同一中心軸上にその半径 a 分だけ隔て置き、同一の電流 I を同じ向きに流すようにした装置であり、その中央位置付近に一様な磁場が形成されることが知られている。中心点での磁場は、

$$H_c = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{I}{a}$$

である。

単独の円形コイルによって作られる磁場は、軸方向磁場 H_z とラジアル方向磁場 H_r で表現され、Smythe (1950) によれば、コイル面からの距離を z 、中心軸からの距離を r とすると、第1種と第2種の完全楕円積分 $K(k)$ と $E(k)$ を用いて、

$$H_z(z, r) = \frac{I}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[K(k) + \frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(k) \right]$$

$$H_r(z, r) = \frac{I}{2\pi} \frac{z}{r\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[-K(k) + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(k) \right]$$

$$k = 2\sqrt{\frac{ar}{(a+r)^2 + z^2}}$$

である。一対のヘルムホルツコイルの場合に求めたい磁場は、軸方向成分 $[H_z(z, r) + H_z(z, a, r)]$ とラジアル方向成分 $[H_r(z, r) + H_r(z, a, r)]$ となり、完全楕円積分 $K(k)$ と $E(k)$ は、

$$K(k) = \frac{\pi}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \right)^2 k^{2n}$$

$$E(k) = \frac{\pi}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \right)^2 \frac{k^{2n}}{1-2n}$$

で計算できる (ウィキペディア, 2015) ので、必要精度に応じて総和演算を打ち切れればよい。

計算結果を、軸方向磁場 H_z ・ラジアル方向磁場 H_r とともに、中心点での磁場 H_c に対する割合で、(軸まわりに円筒対称なので) 軸を含む断面について図 A に示す。

参考文献

- 1) 中塚 正, 2013, 分かり易い物理探査 磁気探査 (4). 物理探査ニュース, no.18, 1-5.
- 2) 中塚 正, 大熊茂雄, 牧野雅彦, 石原丈実, 小谷 廣, 1999, 磁気探査. 物理探査ハンドブック, 手法編, 473-518.
- 3) NF回路設計ブロック, 2009, 雑音に埋もれた信号の測定 ~ ロックインアンプを用いた微小信号の測定. http://www.nfcorp.co.jp/techinfo/keisoku/noise/li_genril.html
- 4) Smythe, W. R., 1950, *Static and dynamic electricity*, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, 616p.
- 5) ウィキペディア, 2014, ヘルムホルツコイル. <https://ja.wikipedia.org/wiki/ヘルムホルツコイル>
- 6) ウィキペディア, 2015, 楕円積分. <https://ja.wikipedia.org/wiki/楕円積分>
- 7) Wikipedia, 2015, Maxwell coil. https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell_coil

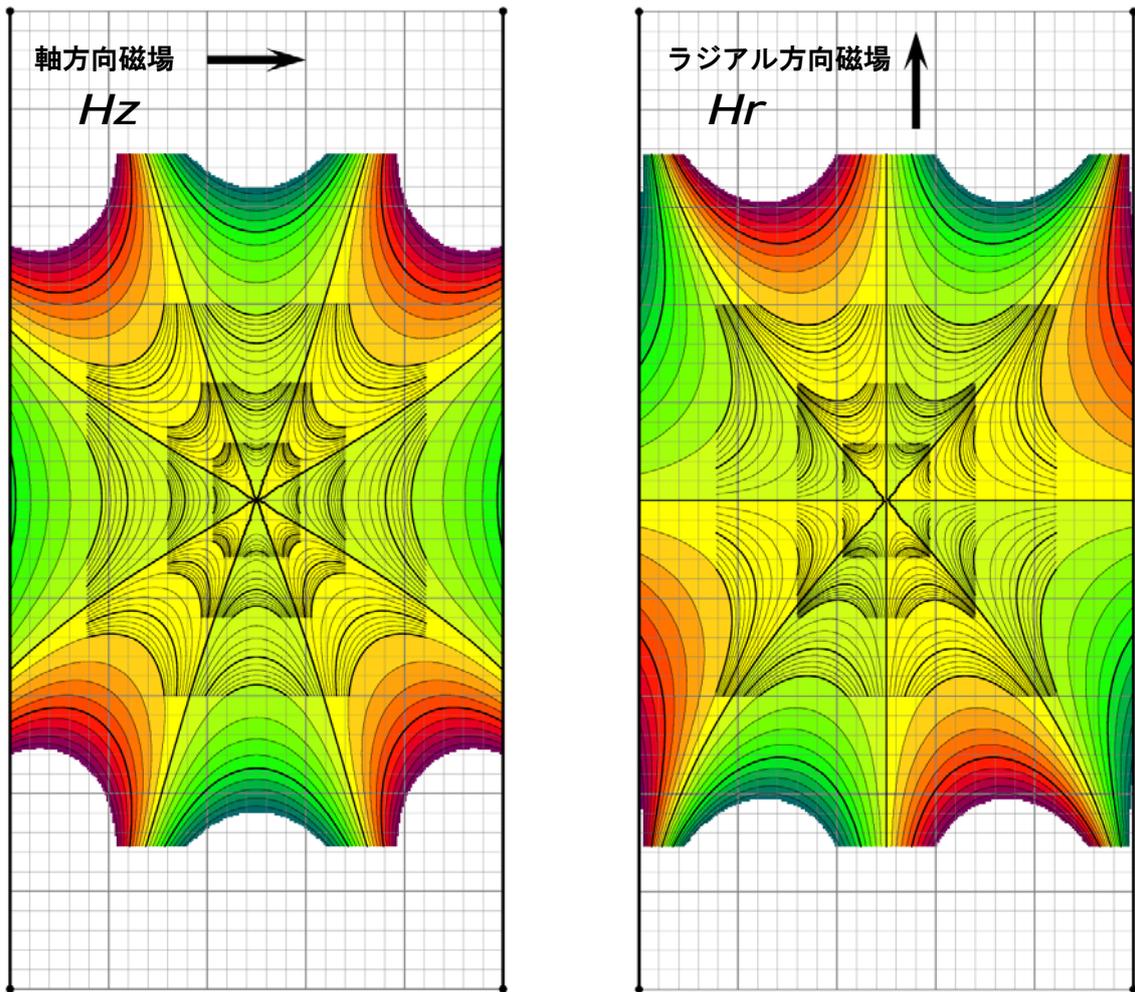


図 A ヘルムホルツコイル内の磁場の一様性からのズレ (理論値)

段彩の色は、黄緑～緑が負の値，黄～赤が正の値を示し， H_z については中心位置での磁場強度 H_c からのずれを表示している．線画コンターは，中心位置に近づくほどその間隔を細かくしてあり， H_c を 10000nT としたとき，外側から 100nT 間隔・10nT 間隔・1nT 間隔・0.1nT 間隔となっている．中心位置から大きく外れる位置と，差が 1000nT 以上の部分は作図を省略し白くなっている．

両側の黒線は，正面から眺めた各コイルの位置をイメージしてある．直径 50cm のヘルムホルツコイルに $H_c=10000\text{nT}$ となる電流を流したときの磁場を，1mm 間隔のメッシュ上で計算した．

物理探査・地化学調査を用いた液状化・豪雨対策

内田 篤貴¹⁾・齊藤 弘昭²⁾・母良田 正一²⁾・大島 雄太²⁾・富里市

1) 日本物理探査株式会社 企画本部

2) 日本物理探査株式会社 関東支店

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震をはじめとする、地震災害、台風、突風等の事自然災害は、毎年のように日本列島に被害の傷跡を残している。今回報告する事例は、千葉県富里市において2011年東北地方太平洋沖地震により液状化を生じたのち、平成26年豪雨により陥没が生じた。本報告は、地震ならびに台風災害により発生した地盤災害に対し、レーダ探査で被害の状況を把握し、液状化対策および豪雨対策として浸透柵を本来の目的とは異なる方法で利用し対策した事例を報告するものである。

2. 災害の概要

2.1 2011年東北地方太平洋沖地震

2011年東北地方太平洋沖地震により千葉県においては、利根川流域、東京湾岸地域、九十九里浜地域において液状化被害を受けた。特に浦安市周辺の被害は大きく報道された。図2.1は、国土交通省・地盤工学会(2011)による関東地方における液状化発生箇所図である。

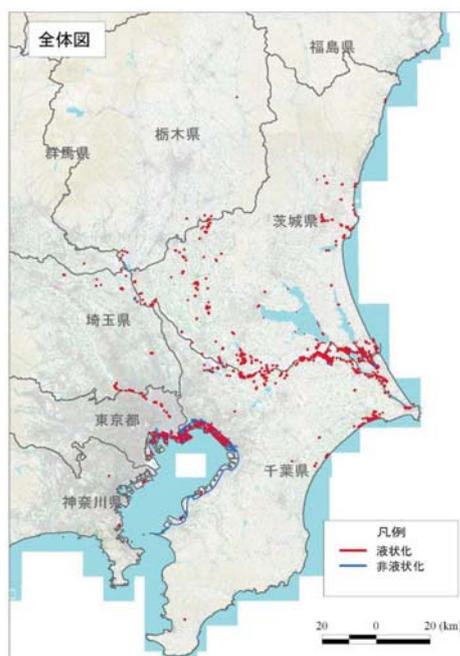


図2.1 関東地方の液状化発生箇所
(国土交通省・地盤工学会, 2011による.)
この図には記載されていないが、小さな液状化

は千葉県富里市、隣接する成田市においても発生していた。



図2.2 地震により生じた液状化跡(富里市提供)



図2.3 地震により生じた液状化跡(富里市提供)

2.2 平成25年台風26号

さらに追い打ちをかけるように、2年後の平成25年10月には台風26号による大雨により公園の液状化跡の延長上に陥没が生じた(約3.0m×2.3m×深さ2.5m)。図2.4に陥没した状況を示す。

この大雨では京成電鉄成田駅の南側法面が崩壊するなど、各地で大きな災害が発生した。

図2.5は、気象庁(2013)による当時の天気図、衛星写真、雨量を示したものである。



図2.4 陥没の状況



図2.5 平成25年10月15日21時の天気図と衛星写真（気象庁，2013による．）

平成25年10月15日～10月16日にかけて関東地方を台風26号が通過し、アメダス観測値によると千葉県千葉市では1時間あたり最大61.5mmの雨量を記録した。この時の最大は東京都伊豆大島で時間あたり122.5mmとなり、大規模な土砂災害が発生している。

また、レーダ観測値では、千葉県成田市において時間あたり70mm以上の降雨を観測している。

3. 現地調査

空洞の発生を受け、その規模の把握ならびにその他の空洞の有無を確認するため、レーダ探査、地下水調査、孔内カメラ観察を実施した。

3.1 レーダ探査

探査測線は、南北方向に1m間隔でレーダ探査を実施した。使用したアンテナは200MHzと400MHzの2種類である。図3.1に使用した機材を示す。



図3.1 レーダ探査に使用した探査機器（400MHzアンテナ，本体，200MHzアンテナ）

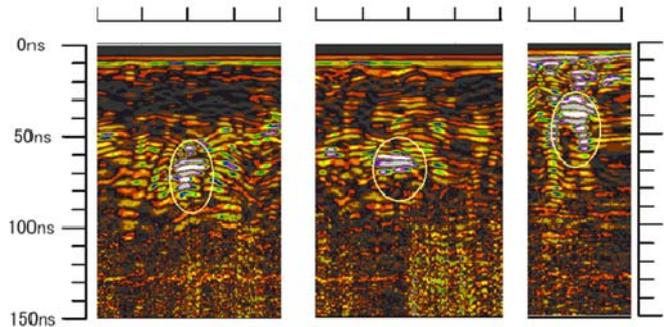


図3.2 レーダ探査測定記録例

探査記録例を図3.2に、探査状況を図3.3にそれぞれ示す。探査の結果14か所の検知点が検出され、すべての点について掘削確認調査を実施したが、いずれも埋設物、地層境界等で空洞は確認されなかった。現状において、地表より3m以浅には空洞がないことが判明した。図3.4に検知されたヒューム管の例を示す。



図3.3 レーダ探査状況



図3.4 レーダ探査により検知されたヒューム管

3.2 地下水調査

本来公園内の地下水は、図3.5に示す通り東側

排水パイプより放流されていたが、陥没後は目詰まりを起こし、図 3.5 (下段) に示す擁壁下部より自噴していた。この地下水について簡易水質測定を実施した結果、水温 15.2°, pH= 7.0, 電気伝導度 61mS/m を示した。湧水量は 50~60L/分であった。雨水に近い不圧の地下水であることも考えられたが、水質が中性で電気伝導度も高いことから地中を流下した被圧地下水であることが判明した。



図3.5 目詰まりした排水管(上段)と擁壁下部より噴出する湧水(下段、指先の周囲には青灰色の砂層が分布)

3.2 トレーサ試験

トレーサ試験は、陥没した穴と湧水を繋ぐ地下水の関連性を明らかにするために実施した。2つの陥没穴内にそれぞれ深度 3m の観測孔を設置した。観測孔はハンドオーガーにより掘削した。掘削した部分に水平ストレナーを切った塩ビパイプを設置した。

トレーサには、周辺環境に無害である食塩を使用した。食塩約 500g を 10 L の水で溶かして観測孔より投入した。観測は、東側地盤よりの湧水箇所と擁壁から湧水する箇所の 2 箇所において電気伝導度を連続的に測定した。

しかし、電気伝導度の変化は認められなかった。現状においては陥没した穴と

擁壁下部よりの湧水との関係をとらえることはできなかった。

3.3 地層構成

ハンドオーガーによるボーリングの結果判明した地層断面の模式図を図3.6に示す。自然水位は、青灰色を示す砂層中のG.L.-2.15m付近で確認された。

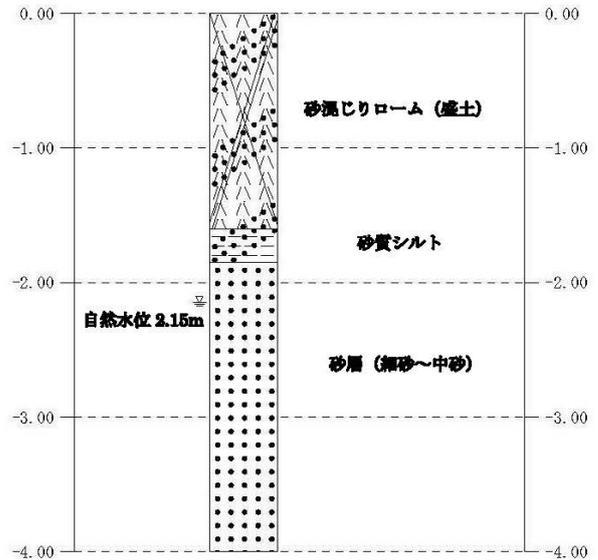


図3.6 地層断面の模式図

3.4 降雨による地下浸透量の推定

対策の範囲を決定するため、降雨による地下水浸透量を推定した。

公園の地下を流れる地下水の集水域は、図 3.7 に示す地形図の高低差より読み取れる分水嶺より下流側の 400m×300m の 120000m² が該当すると考えられた。

集水域は住宅、道路、公共施設等で裸地の比率は約 3 割程度と推定され、豪雨による地下浸透はさらに低くなり、今回の千葉市の 60mm/時間の約 1 割が地下に浸透していくと想定する。

$120000 \times 0.06 \times 0.1 = 720\text{m}^3$ の雨水が地下水となり、下流の公園に流下する。公園からの排水は、排水パイプ 1 本と自然湧水 2 箇所ですべて計 300L/分 = 18m³/時間程度と見積もられる。

したがって $720 - 18 = 702\text{m}^3$ の地下水が広さ約 200m² の公園に集まることとなり、一時的に約 3m 程度の水位上昇が発生することとなる。この水位上昇を少しでも低減するため、できるだけ大きな浸透枘を設置し、排水を促すことが重要である。



図 3.7 分水嶺と集水域

4. まとめ

4.1 陥没の原因

今回発生した陥没の原因について、調査結果に基づき要因を考察すると以下の通りである。

2011年東北地方太平洋沖地震によりG.L.-3.0m以深の淘汰のよい海成の細砂層が液状化を起こし、地表に地下水とともに噴砂を発生させ、地下の地耐力が低下し地盤が緩んだ。そのため旧水路と一致する部分に空洞が形成された。

その空洞はさらなる地下水の水みちとなり、地下水の流路を拡大した。その流路は、既存の地下水の流れとはわずかではあるが異なるものであったと考えられる。

地下水は降雨の影響により水量が増減することで、地下水位の上下変動が発生し、周囲の砂層を少しずつ洗掘していった。

平成25年の台風26号による豪雨により洗掘による空洞がさらに拡大し、地表の陥没へと至った。地層を洗掘した地下水は、旧洪水吐に湧水した。

今回の調査結果を総合すると、陥没の原因は～の要因が複合したものであると考えられた。



図 4.1 東側陥没穴付近に広がる南北の亀裂（液状化跡）

[上段：地震直後（富里市提供），下段：陥没後]



図 4.2 西側空洞付近に広がる南北の噴砂跡

[右上段：地震直後（富里市提供），右下段：陥没後]

そこで、2011年東北地方太平洋沖地震による液状化発生の写真を検証すると、公園を南北に走る2本の亀裂に沿って液状化が発生している(図4.1~図4.2)ことがわかる。今回の陥没はいずれもそれぞれの端部において発生していた。

以上の事象が要因となり、大きな陥没に至ったと考えられる。これらの想定は、陥没穴を結ぶ部分に空洞がなかったこと、陥没穴が液状化の地割れの線状に分布することと整合的である。

公園の湧水は、地下水の涵養域が西側と北側が合流したものである可能性があり、特に北側の涵養域の流末は、鋼矢板で囲まれており、一部の地下水が下流に流出しにくい環境にある。このことは、集中豪雨による水位上昇が公園に集中する一因となっている可能性もある。

4.2 防止対策

今後の対策としては、現在の水みちを閉塞することなく、さらなる陥没を防止することが重要であると考えられる。そのため、陥没穴を土砂で埋め戻し・転圧するだけでは、対策とし不十分である。さらに、水位の変化は淘汰の良い砂層の流出を促進する可能性があることから、さらなる陥没の発生も危惧される。

一般的に液状化対策および陥没防止対策としては以下の工法が考えられる。

地盤改良(ソイルセメント等で地下水の流入を防止)

水位低下後埋め戻し転圧する

浸透柵の設置(不圧地下水の排水促進)

砂礫層に置換し被圧地下水の排水促進(沈下の防止)を促す

今回のケースは、被圧地下水の排水、液状化の再発防止および公園という自然環境の保全という観点から浸透柵の設置、砂礫層に置換し地下水排水の促進が適していると考えた。

4.3 人工砂礫層と浸透柵の設置

現在も直径450mmの浸透柵が設置されているが、涵養域の規模から推定すると規模が小さすぎるため、φ1200mm×1500mm程度の浸透柵を2箇所、液状化の発生した線上に設置した。

浸透柵の下部には、河川堤防で用いる蛇籠をヒントに、人工玉石層の上下に5

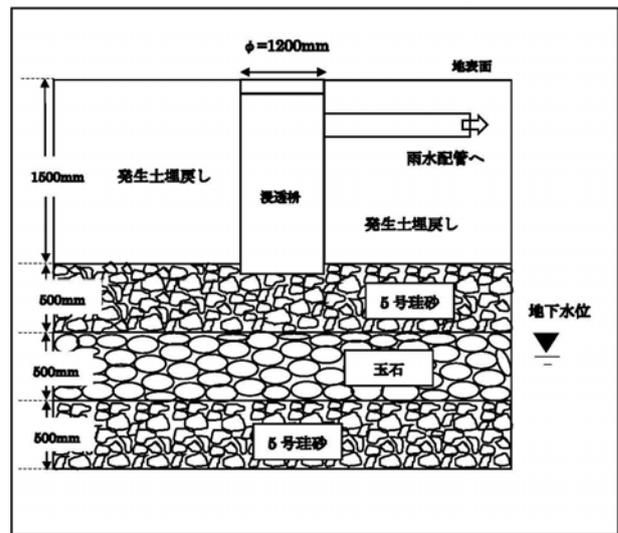


図 4.3 対策工縦断模式図



図 4.4 5号砕石

号砕石(図4.4)を層状に挟む構造(図4.3)とした。玉石からなるふとん籠と砕石は人工的砂礫層となり、排水の促進と地下水水位の変動による地盤の変形にも対応できる人工地層となるよう配置した(図4.3)。

今回用いるふとん籠は、地下に埋め戻すため、金属の錆、地盤との密着性を重視し、ふとん籠を用いる方がよいと考えられた。

浸透柵は、本来雨水を積極的に地下に浸透させるツールであるが、今回は設置した浸透柵と既設の雨水排水本管を連結し、豪雨による急激な水位上昇が発生した場合は、地下水の一部を雨水排水本管に逃がせるよう排水柵本来の目的に付加価値を付けた。



図 4.5 施工中の人工砂礫層となる玉石層の上部に5号珪砂(トレンチシステム引き抜き)



図4.6 トレンチシステムにより施工中の5号珪砂と玉石

対策工施工後, 図4.7に示すとおり擁壁の排水孔の地下水排水は回復した.



図4.7 施工後, 回復した排水パイプ

参考文献

- 1) 気象庁, 2013, 平成25年台風26号に伴う10月15日~16日伊豆大島の豪雨, 災害時気象速報, 22p.
- 2) 国土交通省関東地方整備局・公益社団法人地盤工学会, 2011, 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明, 65p.

編集後記

今年も残すところあとカレンダー1枚となりました。当社は1942年に創業以来74年目を迎えることとなります。これもひとえに皆様のおかげと感謝しております。

再刊するにあたり、各分野の専門家である地震学の名古屋大学武村教授、火山ガスの東京工業大学平林名誉教授に執筆していただきました。ここに記して感謝いたします。この雑誌を多くの方々に読んでいただければ幸いです。

話は変わりますが、最近のコマーシャルで気に入ったシーンがあります。某缶コーヒーのコマーシャルのシーンの1つに、タモリさんが美しい紅葉の季節を迎えた京都の龍安寺の石庭を眺めながら、「これはわかんないね。」と呟いているところに、地球人になりすました宇宙人役のトミー・リー・ジョーンズさんが、超能力を使って紅葉の吹雪が画面いちめんに舞います。そこで、タモリさんが「これはいいねー」というシーンです。そのバックに流れるのが Eric Clapton が歌う「Change the World」という名曲です。聞き覚えのあるかたも多いのではないのでしょうか。



毎年のように災害に見舞われる日本列島にあつて、私たち調査会社の果たす役割の重大さに改めて考えさせられています。

プレミアムとはいかないかも知れませんが、私たちの技術で災害から安心して暮らせる世の中になるよう「Change the World」できたらと考えるこの頃です。

企画本部 内田

地質工学 第13輯

平成27年12月7日発行

編集 日本物理探鑛株式会社 企画本部

印刷所 株式会社エージェンズ

NGP 日本物理探鑛株式会社

本 社 〒143-0027 東京都大田区中馬込二丁目 2 番 12 号 TEL 03(3774)3211 FAX 03(3774)3180
URL : <http://www.n-buturi.co.jp>
E-mail : gijutsu@n-buturi.co.jp

東 関 東 支 店	〒310-0804 水戸市白梅三丁目 10 番 5 号 106	TEL 029(231)7315 FAX 029(231)7316 E-mail : mito@n-buturi.co.jp
関 東 支 店	〒143-0027 東京都大田区中馬込二丁目 2 番 12 号	TEL 03(3774)3161 FAX 03(3774)9353 E-mail : kanto@n-buturi.co.jp
札幌営業所	〒060-0061 北海道札幌市中央区南 1 条西 16 丁目 1-323 春野ビル 3F	TEL 011(558)3121 FAX 011(558)0900 E-mail : sapporo@n-buturi.co.jp
東北営業所	〒980-0021 仙台市青葉区中央四丁目 8 番 15 号	TEL 022(393)4155 FAX 022(393)4156 E-mail : tohoku@n-buturi.co.jp
埼玉営業所	〒336-0912 さいたま市緑区馬場二丁目 32 番 15 号	TEL 048(810)5446 FAX 048(810)5447
千葉営業所	〒274-0814 船橋市新高根五丁目 3 番 4 号	TEL 047(496)2331 FAX 047(496)2332
横浜営業所	〒224-0014 横浜市都筑区牛久保東二丁目 4 番 7 号 107	TEL 045(591)4351 FAX 045(591)4378
北 陸 支 店	〒950-0983 新潟市中央区神道寺三丁目 10 番 37 号	TEL 025(241)2960 FAX 025(241)2959 E-mail : hokuriku@n-buturi.co.jp
中越営業所	〒940-2011 長岡市藤沢二丁目 7 番 6 号	TEL 0258(22)4617 FAX 0258(22)4618
中 部 支 店	〒465-0094 名古屋市名東区亀の井二丁目 134 番地	TEL 052(753)9662 FAX 052(753)9664 E-mail : chubu@n-buturi.co.jp
浜松事務所	〒432-8062 浜松市南区増楽町 2516 番 2 号 RELAFly E-101	TEL 053(449)5970 FAX 053(449)5971
三重営業所	〒511-0041 桑名市外堀 22 番地 ITO ビル 102	TEL 0594(32)7725 FAX 0594(32)7726
関 西 支 店	〒543-0033 大阪市天王寺区堂ヶ芝一丁目 3 番 24 号 LN 堂ヶ芝ビル 2F	TEL 06(6777)3517 FAX 06(6773)5488 E-mail : kansai@n-buturi.co.jp
滋賀営業所	〒520-0246 大津市仰木の里四丁目 13 番 2-204	TEL 077(574)2261 FAX 06(6773)5488
四国営業所	〒760-0012 高松市瀬戸内町 19 番 25 号	TEL 087(863)6191 FAX 087(863)6192 E-mail : shikoku@n-buturi.co.jp
九 州 支 店	〒803-0814 北九州市小倉北区大手町 7 番 38 号 大手町ビル 3F	TEL 093(581)8281 FAX 093(581)8267 E-mail : kyushu@n-buturi.co.jp
山口営業所	〒750-0093 下関市彦島西山町三丁目 22 番 26 号	TEL 0832(61)6436 FAX 0832(61)6437
福岡営業所	〒812-0016 福岡市博多区博多駅南三丁目 13 番 17 号	TEL 092(474)3087 FAX 092(474)3107
沖縄事務所	〒904-2156 沖縄市美里仲原町 11 番 17 号	TEL 098(923)1915 FAX 098(923)1916