

CTBTの現地査察(OSI)における 爆心地の探査ロジック(Search Logics) —その確立と課題—

2011年10月
軍縮不拡散促進センター
客員研究員 小山謹二

1. はじめに

全ての核爆発実験を禁止している包括的核実験禁止条約(CTBT)第4条第1項は、条約が発効し、効力を生じる時には「条約が定める検証にかかる要件を満たす事が出来ているものとする」と規定している。この規定に基づきCTBT準備委員会は、発足後、直ちに条約の遵守にかかる検証制度の整備を開始した。2010年10月に行われたCTBTO事務局長の報道発表¹によれば、「国際監視制度(IMS)の監視観測網の整備は順調に進み、2012年末には条約が配備を規定している全てのIMS監視観測所(321ヶ所)の90%以上が監視観測網に組み込まれる」と、IMSの整備が順調に進んでいる事を紹介している。しかし、検証制度のもう一方の柱である現地査察(OSI)の整備状況については、何も触れていない。本報告では整備の遅れているOSIの爆心地探査に係る探査ロジック(Search Logic)の確立に資するため、地下核爆発(UNE)によって誘起される地球物理学的な異常事象とその痕跡の探査手法を概観し、探査ロジックの基礎となる、有効な査察技術と探査手法について検討する。

2. CTBT検証体制の最後の砦

核爆発実験により生成された放射性核種が、気流に乗り、国境を越えて拡散し、隣国を汚染するような核爆発実験を禁止した部分的核実験禁止条約(PTBT)が発効(1963年)すると、核爆発実験は地下に潜った。配備されているIMSの地震学的監視観測網は、1kt規模のUNE(TNT1,000トンが爆発したのと同じ規模の地下核爆発)が地球上の何処で起きたとしても適時に検知し、かつ爆心地(グランド・ゼロ)の誤差半径を17km以下²で推定する機能を備えている。ちなみにPTBT発効後、米国の行った723回のUNEの中で放射性核種の封じ込めに失敗したのはわずか105件(14.5%)に過ぎない³。従って、UNEが行われと思われる爆発事象が検知されたとしても、核爆発で生成された放射性核種を検知することが出来ない事態が生じる可能性は高い。このような事態が起きた場合に発動さ

¹ CTBTO Press release, 9 November 2010, A decade of “remarkable achievements” in advancing the CTBT, say CTBT Executive Secretary Tibo Toth, <http://www.ctbto.org/press-centre/press-releases/2010/>

² この推定誤差半径の値はOSI査察許容区域(1,000km²)内にグランド・ゼロが存在するための条件である。

³ DOE/NEV-317(Rev.1), “Radiational Effluents Released from U.S. Continental Test 1961 through 1992”, August 1996

れ、条約違反の UNE が行われたか否かを判定するための証拠を集める最終的な検証手段が OSI である。

OSI は、UNE が行われたと推定される地点を中心に設定された査察許容領域（最大 1,000km²）の中で UNE が行われた根拠となる放射性核種の有無を検証する立ち入り査察である。地表での査察活動により当該放射性核種が探知できない場合は、爆心地点（グランド・ゼロ）を突き止め、爆発で造られた地下空洞まで掘削し、資料を採取して核爆発で生成された放射性核種の有無を検証する。採取した試料に当該放射性核種が含まれていれば条約違反の UNE が行われたと結論付ける明白な根拠となる。このように OSI は CTBT 検証体制の最後の砦となる検証手段であり、CTBT 検証体制の有効性と信頼性を保証する重要な役割を担っている。

2008 年に行われた OSI 総合野外試験（IFE08）において、OSI の整備状況が確認され、条約の規定に準拠した OSI を行うには、いまだ課題が残っている事が明らかにされた。整備を急ぐ第 1 の課題は、OSI の実施に係る詳細を定める OSI 運用手引書の策定であり、第 2 の課題は、有効かつ効率的にグランド・ゼロを見付ける探査ロジック（Search Logics）の確立である。

条約違反の UNE が隠密裏に行なわれるとすれば、放射性核種の大気中への放出を抑え、地表には爆発事象の痕跡を極力残さない条件の下で行ない、OSI によりグランド・ゼロを見付けるのが難しい環境の下で行なわれる事になる。従って、探査ロジックは、地球上の如何なる場所で条約違反の UNE が行われたとしても、グランド・ゼロを見付け出す探査機能を備えなければならず、条約違反の UNE が行われたか否かを判定するに十分な根拠、即ち、爆心地点から採取した資料中に該当する放射性核種が存在するか否かを判定するに十分な機能を備えているものでなければならない。

3. 地下爆発（UNE）により誘起される異常状態

CTBT の遵守を立証する検証システムの基本仕様を定めたジュネーブの軍縮委員会・科学技術委員会の議長を務めた Dr. P. Marshal は、1997 年の CTBTO 準備委員会が開催した最初の OSI ワークショップにおいて、UNE が行われた痕跡であり探査目標となる事象⁴（異常状態）を紹介すると共に、爆発の規模と爆発地点の深さ、そして爆発によって造られる空洞の大きさ等の基本的なデータを紹介している。

地下爆発で形成される地下空洞と破砕帯領域の大きさ

⁴ Dr. P. Marshal, Basic Presentation of Subject Leader, CTBT/PC/III/OSI/WS/SL/1, July 1997

- 花崗岩地帯で 1kt の TNT が爆発して出来た地下空洞の半径と爆発地点の深さ

爆発地点の深さ (m)	100m	500m	1,000m
地下空洞の半径 (m)	15m	10m	8m
- 花崗岩地帯の深さ 100m 地点に造られた空洞周辺の破砕帯の半径

爆発の規模	1kt の TNT	10kt の TNT
空洞の半径	~15m	~30m
破砕帯の半径	~35m	~75m

爆発で造られる地下空洞の大きさは①爆発の規模、②爆心地の深さ、そして③爆発地点の地質と地層（岩塩層を含む）によって変わる。北朝鮮（DPRK）が UNE を行った実験場の地質と地勢は、ネバタ、そしてセミパラチンスク（カザフスタン）の核実験場のそれらとは異なる。また、同じ規模の爆発が起きたとしても地下空洞の大きさ、そして破砕帯の広さは異なり、高温領域の広さも変わる事を前提にしてグラウンド・ゼロの探査手法を選択しなければならない。条約違反の UNE が、如何なる環境・条件の下で行われたとしても、条約によって規定されている査察員（査察補助員を含む）の数と許された査察期間⁵の中で明白な根拠となる放射性核種の存在が立証出来なければ「UNE は行われなかった」と帰結されてしまう事を忘れてはならない。

2009 年に開催された国際科学シンポジウム（ISS09）で議論された OSI 査察活動の総括として、OSI の備えるべき検証能力は「地下 1,000m で 1kt の TNT が爆発したのと同等の爆発（以下、1kt 規模の爆発と言う）により造られた地下空洞を見付け、必要に応じてその空洞から資料を採取し、核爆発で生成された放射性核種が含まれているか否かの検証を可能にする」ものでなければならないと OSI 検証能力に関する整備目標が示された⁶。

探査ロジックを検討するに当っては、地表での探査活動が難しいと思われる灌木（ブッシュ）に覆われた山岳地帯に掘られたトンネル内の地下 1,000m 地点で 1kt 規模の爆が起き、放射性核種の封じ込めに成功している場合を想定する。

4. 探査目標となる異常状態とその査察技術

CTBT の条約第 4 条第 47 項の規定に基づいて査察の継続が承認されると、議定書第 II 部第 69 項に記載されている査察手段と技術の全てを用いて、UNE により誘起された地球物理学的な異常状態を探査する事が出来る。以下に、トンネル内の地下 1,000m で 1kt 規模の爆発が残した痕跡の中で、グラウンド・ゼロ探査の目標となり得る典型的な異常状態を列記しておく。

⁵ 現地査察において同時に査察に携わることが許されている査察員（査察員補を含む）は 40 名までであり、査察期間は 60 日間である。

⁶ Zhenfu Li, On-site Inspection, Science for Security, ISS09

- 異常-1** 地下構造に残されている異常：爆心地に造られた空洞と空洞周辺の破碎帯等、トンネル、そして埋設された地下構造材及び電線等。
- 異常-2** 重力場の異常：爆発実験を行ったトンネル等の地下空洞。
- 異常-3** 磁気異常：爆発により発生したキュリー点を超える高温領域で起きる磁気異常⁷。

1kt 規模の UNE の爆発が残したこれらの異常状態の他に、グランド・ゼロの周辺に高温領域（温度異常）、そして、放射線強度異常領域が現れる可能性もあるが、爆心地を地下 1,000m と設定し、放射性核種の封じ込めに成功していると実験条件を設定しているため、何れの異常状態を示す物理量も、地中の伝達率あるいは透過率が低く地表から探知するのは難しい。また、UNE のために埋設されている構造材・電線等による電気伝導度等の異常領域も、深いトンネル内での爆発を想定すると、主要な探査目標とするには無理がある。

更に、CTBT の国際監視制度（IMS）で観測された地震波等の解析により推定された爆心地が、灌木（ブッシュ）に覆われた山岳地帯であれば、地表での査察活動は困難を極め、査察活動の展開（機材の移動と査察員の活動）に係る制約は想像を絶するものとなる。このため、探査ロジックとしては、上記の異常状態をヘリコプターによる上空からの探査によって、異常状態の程度（強さ）のマッピングを行い爆心地点（グランド・ゼロ）の探査に用いることのできる探査手法をベースに検討することにした。以下に、適用可能と思われる探査手法と探査の対象とする異常状態を示しておく。

探査手法-1：重力場探査手法による（異常-2）の探査。

探査手法-2：磁気異常探査手法（異常-3）探査。

探査手法-3：電磁探査手法による埋設物等（異常-1）の探査、及び
破碎帯（異常-1）の探査。

OSI におけるグランド・ゼロの探査手法として調査研究が進められてきた**地震学的探査手法**による地下空洞の探査（受動的地震探査及び能動的な地震探査）は、探査領域が 10km² 程度に絞り込まれた後、最終的に掘削位置を決定するためには有効な手法であるが、広域探査に適用するには多数の高感度地震計を広範囲に展開しなければならない事を考慮すると、査察官の数と許容時間に関する強い制約の中で、ブッシュで覆われた山岳地帯において震学的探査手法を展開するのは困難を極めると思われるので、ここでは検討の対象としていない。

以下に、各探査手法の特性と、それらの手法を探査ロジックに用いる場合に問

⁷ 爆発時、爆心地点の岩石等は加熱され高温になり、その温度はキュリー点を超え地磁気磁場異常を起こす原因となる。

題となる事項を纏めておく。

探査手法-1

地表面における重力場の変動量分布測定からによる探査の目標となる空洞（異常-2）を識別するためには、空洞内の岩石等を掘り出して造られた空洞（例えばトンネル）であれば、掘り出した岩石の質量による重力場が“ゼロ”となり、重力場異常を起こす。しかし、爆心地に造られた空洞は、元来、空洞内にあった岩石を取り出し、排除したのではなく、岩石が高熱で融解され、高密度のガラス状物質に成り、空洞の内面を覆っている。ここで、空洞の大きさをガラス状の内張り部分を含めたものとみなせば、空洞内から取り出された岩石は無く、重力場に異常は現れず、探査目標の異常には該当しない。

査察手法-2

磁気探査法は、UNE によって発生し、残留している磁気異常（異常-3）の強さと広がり測定し、マッピングするものである。空中磁気探査機器の性能は、近年、著しい進歩を遂げ、地質探査に幅広く活用されている。空中物理探査システムを提供している OYO 空中地下探査システム⁸に組み込まれている、光ポンプ・セシウム磁力計を収納したバードをヘリコプターにより曳航し、地盤が持つ磁気から形成される磁場を測定する事を前提とした場合において、測定磁場の分解能と測定可能な磁場レベルを調べたところ、その仕様は、CTBT/WS/OSI-6/1 において勧告されたグラウンド・ゼロの探査に用いる磁力計の備えるべき仕様⁹を全て満たしていることが明らかになった。

そこで、この OYO の空中地下探査システムを空中からグラウンド・ゼロを見付けるための有力な探査手法の一つとして試験し、UNE で誘起された磁気異常の識別機能と磁気異常分布の探知可能な範囲等に関する基礎データを収集し、分析する事によりグラウンド・ゼロ探査用の磁気探査システムの備えるべき基本仕様を明らかにし OSI で活用可能なシステムの開発を急ぐ必要がある。なお、OYO 空中地下探査システムのバードに搭載されている磁力計の主な仕様は以下の通りである¹⁰。

分解能 : 0.001nT
測定レベル : 20.000 ~ 100,000nT
サンプリング : 0.1sec

探査手法-3

ここで取り上げる電磁探査手法は、誘導電磁法と言われる手法であり、探査範

⁸ 応用地質株式会社 http://www.oyo.co.jp/tecnology/001_kuutan.html

⁹ Functional Requirements for Magnetic Field Mapping, CTBT/WS/OSI-6/1

¹⁰ 中山文也、五十嵐亨、“OYO 空中地下探査システム*の地滑り調査への適用”

囲を地下 100m から 150m にまで拡げるため、通常 100Hz～5kHz の周波数の範囲で異なる周波数の電磁波送受信コイル対を曳航し、地盤に電磁波を送受信しながら地盤の電磁応答を測定して、地中の電気伝導度（比抵抗）の異なる地盤・地層の境界、あるいは物体を識別する探査手法であり、前述の磁気探査法と同じく空中物理探査手法を構成する主要な探査手法として、OYO 空中地下探査システムに組み込まれている。バードに搭載されている誘導電磁法測定器の主な仕様は、以下の通り。

水平コイル : 56kHz、4800Hz、385Hz、
垂直コイル : 7200Hz、900Hz、
各周波数に : 同相・離相の 2 成分測定
ノイズレベル : 2ppm
サンプリング : 1 秒間隔

このバード搭載されている誘導電磁法測定器は、ヘリコプターに曳航され、広範な査察範囲を短時間で探査出来るが、本来上空から浅い地層の地質調査を行う手段として開発されたものであり地下に埋設された UNE 制御用ケーブル等の探知能力について試験する必要がある。また、地下 1,000m 近傍の爆心地にある空洞、そして、空洞を取り巻く破碎帯の探査を可能にする電磁探査手法も開発されているが、地上に 2～3km におよぶ送信ライン（アンテナ）を設置する必要があり、最終目標であるグラウンド・ゼロ見付けるには有効な手法であるが広域探査に適した手法とは言えない。

5. 探査ロジックの確立に向けて

探査目標は、DPRK の核実験場と同様な環境（灌木（ブッシュ）に覆われた山岳地帯）に掘削されたトンネルの中の地下 1,000m で、1kt 規模の爆発を起こした爆心地（グラウンド・ゼロ）である。このような環境の下で、グラウンド・ゼロを有効かつ効率的に見付けることのできる探査ロジックを構成する事が可能と思われる探査手法について、調査研究を急ぐべきであると考え。目視探査による異常状態の発見は出来ず、核爆発で生成された放射性核種の検知された事実も無く、さらに、査察許可区域の大部分はブッシュに覆われた山岳地帯であり、人の移動（徒歩あるいは 4 輪駆動車）も困難な状況の下で、爆心地点（グラウンド・ゼロ）を探り当てる探査手法は、唯一、上空から異常状態のマッピングが可能な手法をベースに構成し、グラウンド・ゼロを絞り込んでいく手法しかないと思われる。

これまでの調査分析の結果、このような条件を満たすのは「磁場異常」の探知であり、**査察手法-2** で概観した磁気探査法の探知が、最も有望な手法である。

原理的には観測された磁気異常のマッピングによりグラウンド・ゼロの探査ロジックを構築する事は可能である。しかし探知可能な爆心地に残されている残留磁気異常の強さと広がりはいまだ定かではない。さらに、グラウンド・ゼロ近傍に現

れる磁気異常のレベルは周辺の地質（磁性体）分布によって誘起される磁場の不均質性、及び磁気嵐による外乱（ノイズ）にマスクされてしまう可能性を考慮しなければならない。

かかる状況では地下 1,000m で起きた 1kt 規模の爆発が残した磁気異常を上空から探知する探知（探索可能）な範囲を検討するには未だ情報が不足している。この問題を解決し、探査ロジックを確立するためには残留磁気の強さを決めるメカニズムについて詳細なデータを収集すると共に、探査線の密度（探査飛行の路線の間隔）と飛行高度（爆心地と観測点の距離）を決定するに十分な観測データを取得し、データ・ベース化を急ぐ必要がある。

（以上）