

南コーカサスのひょう抑制実験*

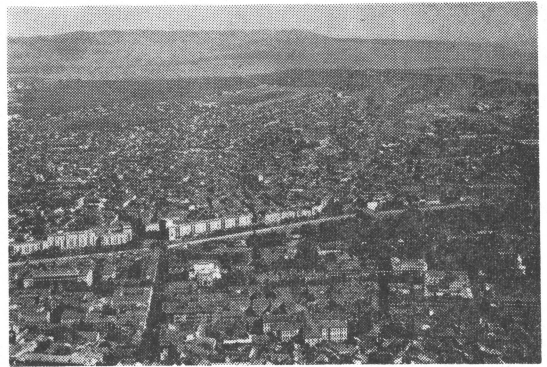
大 田 正 次**

1. ま え が き

1969年9月にチェコスロバキヤのプラハおよびオーストリアのウインで大気凝結核および氷晶核に関する第7回国際会議が開かれた。筆者は幸いその会議に出席することができたので、その機会にかねてうわさに聞いていたソ連のひょう抑制実験を見たいと思い立った。その動機は1967年にカナダのトロントで開かれた国際雲物理会議で、ソ連の雲物理学者 G.R. Sulakvelidze が、ひょうの人工制御に関するレビューを行なった中で、ソ連における実験はほぼ成功しているという記事があったからである。一方昨年夏にアメリカの気象の人工調節研究を視察された防災科学技術センターの小元敬男氏がアメリカからの私信で、アメリカの ESSA や NCAR の雲物理学者を中心とする代表団の一行5人がソ連の気象調節の研究を視察した結果から判断して、コーカサスの実験を見るのが効果的であろうという情報を寄せられたので、早速具体的な計画を立てたのである。ところが日本を出発する間際になっても、どういわけかソ連入国のビザが手に入らず、やむを得ずそのままプラハの会議へ出発した。しかし幸なことに気象庁長官からソ連水理気象局長官へ直接電報で申入れしていただいた結果、プラハのソ連大使館でモスクワならびにグルジャ共和国(南コーカサス)訪問のビザを入手することができた。ソ連においては、立ち立った視察をすることが現在なお容易ではないということをしみじみ感じた。

2. 南コーカサス水理気象研究所

9月30日(火)モスクワのローカル空港プニコバで四



第1図 トビリシの街からひょう抑制実験場方面(写真上部の丘陵地帯)を望む。

発のジェット機に乗り、標高5,000m級の氷雪をいただいたコーカサス山脈の上をこえて、約2時間半の後に南コーカサスのグルジャ共和国の首都トビリシに着いた。空港には研究所の所長代理クバラチェリヤ博士と幹部数名の方々が、若い通訳のペリタシュヴイリ氏(雲物理学担当)とともに迎えて下さった。

グルジャ共和国はコーカサス山脈の南側の黒海に面した小さい国で、面積は北海道くらいである。首都トビリシは人口約80万でヨーロッパ風の美しい古都である。雨もよりの暗い雲におおわれたモスクワから来ると、明るい南国にきた思いがする。この街は5世紀の頃一人の武将が狩猟中に矢に当たってぎずついた鳥のあとをつけ、おいかけたところ、河のほとりに温泉があることを発見し、その温泉場が中心となって発展してきたものであるという。今でもその付近は街はずれで湯治場となっている。

この街にある南コーカサス水理気象研究所は古い歴史をもった研究所で、1844年に地磁気一気象観測所として発足し、色々の経緯を経て1953年に現在の名称となっ

* Hail Suppression Experiments in the South Caucasus.

** Shohji Ohta 気象研究所
—1970年7月18日受理—

た、数年前に9階建の新しいビルに建て変っている。8研究部200人の世帯であるから、ほぼわれわれの気象研究所と同程度の規模である。予報、気候、高層、農業気象、大気汚染、雲物理、気象制御、水理気象等の研究が行なわれている。

ついでながらソ連の水理気象局管下には5カ所の中心的な大研究所と、13カ所のローカルな研究所がある。大研究所は当所のほかウクライナ（所在地キエフ）、中央アジア（所在地タシケント）、極東（所在地ウラジオストク）、カサック（所在地アルマータ）である。

なおトビリシには気象関係の機関としては当研究所のほかモスクワ水理気象局管下の気象台、別系統の科学アカデミー所属の地球物理研究所およびトビリシ大学がある。

10月1日（水）当研究所を訪れ、所長室で当所の研究概要を伺った。所長室には当所の部長さん方が集まっておられ、後にきいた所によると、一番若い人が55才くらいで、ほとんどは60才前後であった。所長のロミナーゼ博士は目下アメリカへ出張中で不在であった。当所の歴史については先にのべたが、構内の一角に初期のレンガ造りの観測塔が残っている。所長室に飾ってあった写真の中に、この塔を背景にして一人の若い青年が露場内の百葉箱を開けている場面があった。説明をきくと、その青年はJ.V. スターリンで、彼は若い頃(1899~1901)当所に勤め、気象観測に従事していたという。彼の生家はこの街の近くである。街を見降ろす小高い丘の上の寺院の一角にスターリンの母(1855~1957)の墓碑がひっそりとした感じで立っていたのが印象に残っている。

つづいて所内を案内していただいた。雲物理研究用の霧箱は目下この建物内に建造中で、コンクリート工事の最中であった。直径3.5m、高さ8mの円筒型の箱で、壁面はコンクリートであるが、中に断熱材が入っているという。この箱は低温低圧操作が可能で、壁のあちこちに観測用の窓や、種まきの穴や、水蒸気補給用のパイプがついている。さしあたりの研究テーマは冷たい霧を作って種まきの実験をするという。通訳の若い雲物理学者のペリタシュ・ヴイリ氏は、恐らく当所内では数少ない英語の話せる人で、たいていの場合この人が一緒にいて通訳に当たってくれた。この若い研究者の専門は雲力学で、ドイツから輸入した大型のステレオ撮影装置を目下組立て中であった。彼はこの装置を用いて積雲などの雲の形の変化をつかみたいという。所内を一巡した印象では、女性の職員が多く、しかも「コーカサス美人」のうわさ



第2図 雷雲探知用レーダー；左3cm波、右10cm波アンテナ、手前の砲は予備用。

のとおりであった。なお当所で出版される機関誌などの公式なものにはロシア語であるが、職員は日常グルジア語を話しグルジア語の新聞を読む。

3. ひょう抑制実験本部

10月2日（木）車で研究所を出発して、ひょう抑制実験の現場に向った（第1図）。担当の部長のほか、古参の部長と通訳のペリタシュ・ヴイリ氏が同行した。車はトビリシの街を通りすぎて市の南西方向に向かい、やがてコーカサスの山道にかかる。道は舗装されていてドライブは快適であった。所々に赤レンガ造りや木造の農家の見える山道を約1時間半登ると、標高950mの広い丘の上に出る。ここに当研究所のひょう抑制実験本部がある。車を降りると、現場の老所長や若い技術者が大勢迎えてくれた。初めて外国人がやってきて、もの珍らしさもあったのであろう。丘は背丈のあまり高くないかん木におおわれ、林のあちこちに木造の建物が見え、レーダーのアンテナが2個林の上に高く頭を出していた。また布でカバーした高射砲のような形の砲が数台あった（第2図）。

早速レーダー車の中に入ってみた。担当者が車上のアンテナをまわしてPPIスコープを見せてくれた。このアンテナの波長は3cmである。少しはなれた位置にもう一台レーダー車があり、その車の上には10cm波のアンテナがついている。担当者はスイッチを切り替えてその10cm波のアンテナをまわし、同じPPIスコープに10cm波のエコーを出してくれた。この二つの波長のアンテナは、電波の減衰を考慮して適宜使いわけるためであるという。

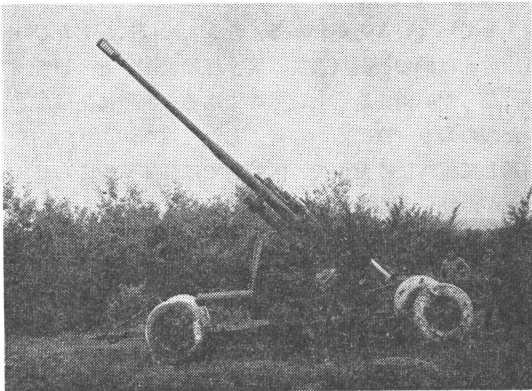
このレーダーが雷雲のひょう生成センター発見のきめ手の役目をする。すなわち雷雲を発見すると、反射電波

の利得をだんだんに弱めて、雲の中の最も反射強度の強い部分を見出す。その部分の反射強度がある一定の値以上であると、その場所でひょうが生成されつつあると判定する。反射強度の強さは経験的に決めたもので、その値は Z を反射係数とすると、 $\log Z \geq 2$ (3cm波) である。またその部分が上昇しつつあるときにはひょうの生成活動は発達しつつあるものとみなし、逆に下降しつつあるときには消滅に向かいつつあるとみなす。このようにしてひょう生成のセンターを発見すると、その方位角、高度角および直距離をよみとり、それらの値は直ちにひょう砲へ無線で通知される。

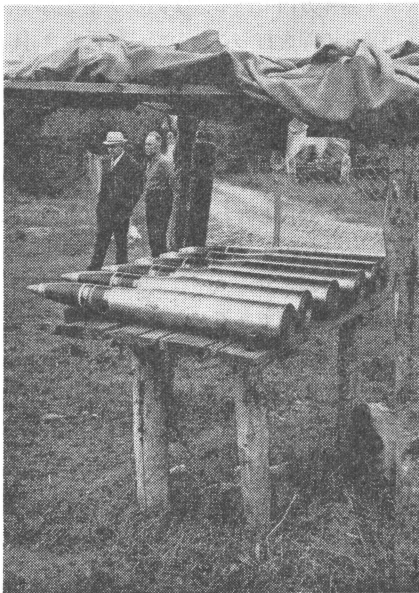
ついでひょう弾の発射現場へ行った。比較的広い裸地



第5図 ひょう弾の大きさ



第3図 ひょう砲に弾をつめるところ



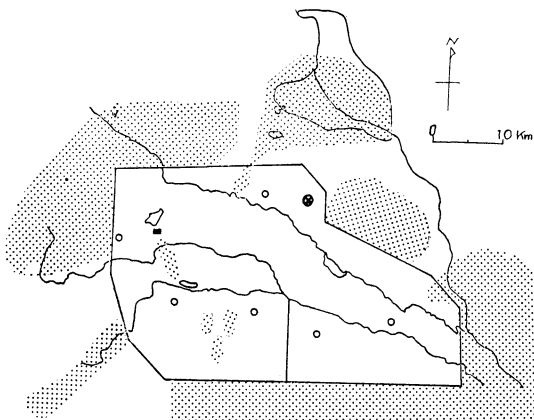
第4図 ひょう弾置場

の中央に現用のひょう砲が一台据えてある(第3図)。この砲は高射砲を改良して作ったものであるという。その近くに木組みの弾置場が2カ所ある。その1つは沃化銀を含んだ弾の置場で、弾が6発台の上にねかせてある(第4図)。弾は全長1m20cm くらいで発射用の火薬がつまっている。筒の直径は20cmで長さ90cm、弾丸部の直径は10cmで長さ30cm程度である(第5図)。弾丸の中には沃化銀75g および火薬が入っている。弾丸の先端部をスパナ様の金具でねじて起爆用のタイマーを調整する。レーダーからひょう生成のセンターまでの直距離がわかると、直ちにこのタイマーを調整し、弾を砲につめる。ついでレーダーから通知された方位角、高度角に従って砲の照準を行なう。この操作は2人の若い担当者によって迅速に行なわれた。当日は雷雲がなく、当局(航空管制機関など)の許可がとってなかったので、実弾の発射はしなかった。別の弾置場にも5発くらい弾が並べてあった。この弾の弾丸部には食塩235g および火薬が入っている。先にのべた沃化銀の入った弾丸と、食塩の入った弾丸を1組としてひょう雲に打ちこむのが当研究所の独特の方法である。前者はひょう生成の中心部(およそ -5°C 付近)に打ちこまれ、それによって多数のひょうの芽を作って個々のひょうの成長を防いでひょうの細分化をはかり、ついで後者をその直下の 0°C 付近に打ちこみ、これによって降雨を増加させてひょう生成中心部への水分補給をおさえるのがねらいである。

写真でも見られるようにひょう砲の砲身は長く、その射程は約15kmである。また弾丸の初速は850m/secであるので、風によってねらいが狂うことはほとんどないという。広場の片隅には使用済みの弾殻が山と積んであった。

つづいて技術的な詳細をきくために木造の小さな建物に入った。部屋の壁にはひょう防御区域を中心とするひょう害分布図や、防御区域に接近し通過した雷雲の降水の型の変化状況の分布を示す事例図が掛けてあった。ひょう害を防止するために設定された防御区域は東西約50km、南北約30km、面積は約1500km²で、我国の埼玉県約の約半分の広さである(第6図)。本部すなわち現在地は図の中央の北端部にあり、ひょう砲は本所を含めて9カ所に配置されている。

ひょう雲の制御は次の手順で行なわれる。まず本部にある3cm波または10cm波のレーダーで雷雲を発見する。雷雲からのエコー強度が経験的に決められた値(前述)を越えると、その位置範囲をひょう生成域であるとみなす。今までの測定例ではその位置の気温は-5°C付近にあるという。この位置の方位角、高度角および直距離を求め、そのデータを最寄りのひょう砲地点へ通知する。ひょう砲地点ではこの生成域が射程(約15km)以内に入り、しかも防御区域境界の5km先に接近したときにはじめてひょう弾を発射する。その場合前にものべたようにまず沃化銀の弾を発射し、ついで(操作上約1分間かかる)食塩の弾を生成域の鉛直下方の0°C付近の層に打ちこむ。この2発で1組である。レーダーは引きつづきその中心部を監視し、もし1組の弾で中心部が消滅しなければ次の発射を指示する。このようにして次々に最寄のひょう砲からひょう弾を発射し、ひょう生成域がレーダーエコーから消えるまでそれをつづける。弱いひょう雲では1組か2組、強いひょう雲では10組から20組、平均して5組の弾が1個のひょう雲のひょう生成域



第6図 ひょう防御区域(実線)と年間のひょう害発生区域(陰をつけた部分)、⊗印は本部所在地。

を消すために打ち込まれるという。

ところで1発の弾の中には沃化銀75gが入っているの、これが破裂すると約10¹²個の氷晶核を作る。また食塩は235gであって約10¹¹個の食塩核を作る。晴れた日のテストの結果によると、弾が爆発すると核は瞬間的に直経約150mの空間に広がり、引きつづいて拡散によりだんだん広がっていく。また実測結果によると食塩核の濃度は400~600個/m³程度で、核の大きさは5~10ミクロンである。しかしここにあげた数字はいずれもはっきりした値ではないという。第6図には1年間(1968)のひょう害分布を陰をつけて示してある。これを見ると、ひょう防御区域外ではひょう害がかなりの広い面積にわたって発生しているのに対し、防御区域内ではほとんど発生していないことがわかる。なおこの図に示したひょう害分布は国の機関(農業機関、保険機関)と当研究所の行なった結果を総合したものである。部屋に掲げてあった図のもう一枚は西から接近した雷雲が防御区域内を通過して東へ抜けた例で、区域前ではひょうを降らせていたが、ひょう弾を打ちこんだ結果ひょうはあられに変わり、雷雲が防御区域内に侵入して間もなく、あられは雨に変わっている。

さて当地方の降ひょう期は4月から10月までで、今年(1969年)は約100個のひょう雲が防御区域に接近した。多いときには1日に8回も接近したことがあったという。そこで、この実験に要する経費について聞いてみた。弾代は1発4万円である。1個のひょう雲に平均して5組(10発)の弾を打ちこむので、弾代の合計は年間4,000万円となる。一方人件費を当てみると、本部要員は女子職員5人を含めて約30人、ひょう砲1個所に4人づつ配置されているので、総計約60人がこの仕事に従事している。これらの人件費およびその他の雑費が約1億円強で、前記の弾代と合わせると年間の実験費は総計約1億5,000万円である。一方これに対してひょう害による果樹野菜等(ぶどう、タバコ、りんごその他)の損害推定額は10~12億円であるという。

見学の間に私は白黒やカラーの写真を沢山撮った。またたった1人の通訳を通じて次々に色々質問した。トビリシの研究所から同行した部長さん方や、実験本部の所長さんはじめ技術関係の方々10人ばかりが私の写真をとるのを眺め、また通訳を通じてのまわりくどい質問に根気よくつき合ってくれた。この見学は昼食時をはさんで4時間ばかりかかった。見学終了後私達約10人は車に分乗して丘をくだり、農家の点在する中腹の部落に

あるレストラン兼居酒屋風の部屋に到着き、そこでチーズや肉を中心とした盛大な会食が催された。飲物は名物の白ぶどう酒である。この会食はまずトビリシから来た老部長の実験の成功を祝福する挨拶にはじまり、つづいて私は本実験を研究という段階から業務的な段階にまで発展させた各位の努力を高く評価する旨の挨拶を行なった。会食の時、主催者や客が次々と発言し、その都度乾杯するのがグルジャの習慣だということはトビリシ帯在中度々経験したが、余り飲めない筆者はその都度苦勞した。居酒屋で見たぶどう酒の容器が2リットルくらい入る口長の素焼のかめで、その形と古さが良いとほめたら、亭主が一本みやげに呉れた。これは東京につくまで私の大荷物の1つとなった。

10月3日(金)再びトビリシの研究所に赴き、昨日の現地視察の際に聞きもしたことその他について議論し、午後おそく飛行場に赴き、モスクワに帰った。

4. グルジャ科学アカデミーの実験

筆者より半年前にアメリカの視察団一行6人が当地を訪ずれ、ひょう抑制実験の視察をしている。その報告書(Bull. Amer. Meteor. Soc., 50, 1969, 918-922; 924-945)によると、彼等は5月13日午後1時に南コーカサス水理気象研究所の所長室で、同所の幹部とひょう抑制について若干の討論を行なっているが、現場は見えていない。しかしその翌日彼等は同じ街にあるグルジャ共和国科学アカデミーの地球物理研究所を訪ね、同所の実施しているひょう抑制実験の現場を視察しているので、それについてのべた L. J. Battan (アリゾナ大学大気物理研究所)の記事を、筆者の分の補足または比較の意味で簡単に紹介する。

まず彼等は当日午前中トビリシにある同研究所で目下建造中の大型霧箱を見ている。それは直径4.6m、高さ17mの本体と、その上部には付加された直径1m、高さ20mの管からなり、気温および気圧の調節ができる。また管の中では20m/sec程度の強い上昇流を起こすことができる。

ついで彼等は午後ひょう抑制実験の見物にでかけた。当研究所の防御区域は前述の水理気象研究所の区域の東側に位置していて、その面積は約3倍の4,900km²である。ここにおける作業の決め手は3cm波レーダーである。レーダー反射係数の最大値が $\log Z \geq 2$ のときにひょうが発生するとみなし、さらにエコーの広さ、高さなどのレーダーのデータおよびゾンデのデータによる気温などをパラメーターとしてひょう発生の確率をきめる。

ここの特徴は抑制にロケット弾を用いる点である。ロケットの射程は約10kmで、この区域内に12点の発射点を設けている。種の材料は沃化鉛か沃化銀を用いる。室内実験で確めた所では-10°Cで10¹²個/gmの核を作る。沃化鉛の量は火薬と合せて1ロケットにつき3kgで、これが45秒間に燃えつくす。発火の位置はロケット弾の先につけたダイヤルをまわして調節し時限装置を作動させる。発火の高さは-5°Cの付近である。なおロケットの殻はパラシュートで落下する。

ロケット地点には2人の操作員がいて、本部からの無線電話によって方位角、高度角、直距離を知り、発射する。当所のひょうの研究は1953年にスタートし、1961年にはほぼ現在のやり方に固まった。約300人の人員がこの業務に直接に従事しているが、そのうち約50人は研究者で、残りの方々は防御区域の農業関係者またはその給与を受けている人々である。

この実験の利益の評価は水理気象研究所のそれとほぼ同様の方法で行なわれ、その結果によると損害推定額10に対し、実験経費は1の割合である。

5. まとめ

ソ連のひょう抑制実験は大すじとしては研究段階というよりは定型化した技術的作業の段階にある。実験の効果については、その評価のデータが正しい限り明確で、しかも十分に採算がとれていると云える。

しかしながらそのような成功にもかかわらず問題がないわけではない。たとえば抑制作用の物理的なプロセスがよくわかっていないこと、評価方法に多少客観性を欠いているような感じのあること、ひょうの抑制には成功したが、それに伴う降雨量の増減はなかったか、いかにえれば降雨量の点で損失を受けていないかなどである。

現在技術を改善しようとしていくつかの試みがなされているが、それが仲々成功しないのは、やはりひょう雲自体および抑制過程が物理的にはっきりしていないからであると思われる。たとえば種まきには砲弾の方がよいか、ロケットの方がよいか、水理気象研究所のように雲の下部に食塩核をまく方がよいか、まく必要はないのか、種まき材料や量、まく位置などの問題について、その適否を判断する手がかりがほとんどないように思われる。要するにソ連のひょう抑制実験は抑制技術が先行して現象の物理的解明が後を追いかけている感じである。それにもかかわらず筆者は気象調節の研究の進め方としてはソ連のこのようなやり方も1つの方法ではないだろうかと思っている。