

大和平野導水トンネルの圧気掘さく施工について

吉 原 正 明*
川 口 源 九 郎**

1. 大和平野導水トンネルについて

紀の川の上流吉野川の水をかんがい用水として、大和平野に導くことは昔から考えられていた。戦後この導水事業が、紀の川十津川の水を調整する総合開発事業の一環として、昭和 28 年から実施されることになった。大和平野導水トンネルは、奈良県吉野郡大淀町西町における吉野川北岸に始まる第 1 号トンネル（勾配 1/1 000、延長 3 199.745 m、幅高さともに 2.742 m の馬蹄型、断面積 6.235 m²）、開渠（延長約 350 m）、南葛城郡葛村字樋野におわる第 2 号トンネル（延長約 1 700 m、幅高さともに 2.658 m の馬蹄型、断面積 5.859 m²）よりなる。この大和平野導水トンネル工事は、農林省十津川紀の川農業水利事業所監督のもとに、株式会社奥村組が昭和 28 年末より請負施工中である。本報告においては、第 1 号トンネル工事の圧気工法の掘さく施工について述べる。

2. 第 1 号トンネルの地質について

近畿地方における中央構造線は、和歌山、粉河、橋本、五条の北、大淀等紀の川の北岸に沿い、高見山の南を通り、宇治山田を経て伊勢湾にはいつている。この構造線は何度も活動し、そのつど断層や圧砕を生じ、破碎帯は相当広い地域におよんでいる。この破碎帯の北は和泉砂岩に、南は結晶片岩に接している。構造線は若い堆積物におおわれているので、露頭部分は断続的である。第 1 号トンネルの所では、吉野川の北岸の結晶片岩と、その北の和泉砂岩との間の構造線上に堆積した洪積層があり、トンネルはこれを横断している。この洪積層は龍門礫層と大淀礫層からなっている。この龍門礫層は吉野

川の跡といわれ、粘土に玉石礫交り不透水性の河底沈澱層であり、大淀礫層は湖水の跡といわれ、細砂に玉石礫交り、ときに埋木のある透水性の湖底沈澱層である。

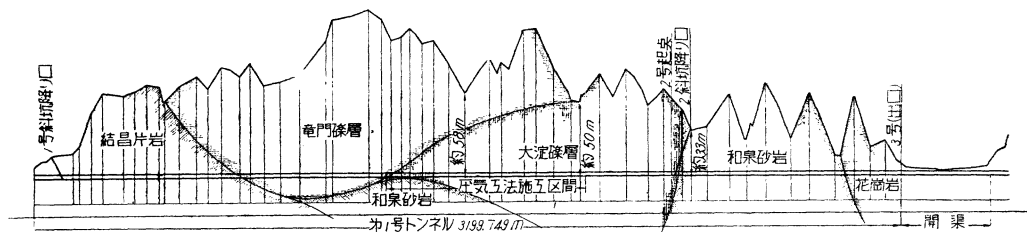
農林省においてもかかる悪地質を横切るので、ボーリングを 4 カ所、電探および弾性波探査によつて地下構造を探查されていた。図-1 縦断図は、探査による地質図で、トンネルの洪積層区間は約 1 650 m にわたり、大淀礫層の最大の土被りは 50 m 以上あるが、全厚が湧水をとまなう礫層でなく、その層中には水平に不透水の粘土層が砂礫層と互層になつて数層あり、池沼等の地表水は遮断されていた。

3. 圧気工法に至るまで

昭和 28 年 12 月第 1 号トンネルは 1 号斜坑より下流方向へ、2 号斜坑より上流方向および下流方向へ、3 号出口より上流方向への 4 カ所から普通工法で掘さくを開始した。2 号斜坑では図-1 のように 2 号起点 72 m において大淀礫層に入り同 80 m 付近で 29 年 4 月初めに約 30 l/sec の湧水にあつた。しかしこの水は約 1 カ月を経て減水し掘さくを進めることができた。ところが 29 年 9 月 16 日同起点 350 m 付近で第 2 回目の湧水にあい、その水量約 60 l/sec であつた。排水設備の増設後、鏡板をはつて掘さくを進めたが依然減水せず、11 月末までに導坑は 8 m しか進め得なかつた。12 月 1 日よりウエルポイント工法にとりかかつたが、集水作業開始後二昼夜半にして、12 月 24 日未明導坑約 6 m が流出土砂で埋められた。

一方農林省においても、4 月の第 1 回湧水の頃より再三トンネル権威者並びに地質学者を交えて、1 号斜坑と

図-1 縦断図



* 正員 株式会社奥村組社員
** 正員 株式会社奥村組社員

2 号斜坑間の未掘さく区間約 1 200 m について対策工法の検討を行つた。その結果 1 号斜坑以奥は地肌を倦まき

ないようにただちに覆工してゆけば、さらに 400~500 m くらいの掘さくは可能であろうとされたが、残 800~700 m 間の工法について種々検討された。

すなわち迂回水抜坑工法、薬液注入工法、シールド工法なども考えられたが地質、工期、予算等を考慮した結果、次の理由により圧気工法を採用することとなった。

- a) この地点以外にも大湧水に遭遇する可能性がある。
- b) 地山は圧気の適用によつて非常に安定化する土質である。
- c) 圧気工法によれば掘さくに計画性が与えられ、31年5月通水の竣工予定に間にあう。

なお空気圧力についてはボーリングの際、砂

礫層と粘土層がほぼ水平の互層をなしており、この粘土層より下の砂礫層の水頭は粘土層より高くなく、かつ掘さく中の水圧について調査の結果 10 lb/in² 前後で、最高 15 lb/in² を超えないだろう、との推定のもとに設計圧力を 20 lb/in² にとることに決定した。

4. 圧気工法の設備について

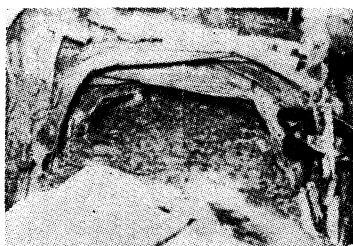
(1) 動力について 従来の電力 (300 kWh) については大淀町下淵変電所より農林省事業所に受電し支給をうけていた。圧気工法に対しては送電を中止することは絶対にできないので、少くとも、もう 1カ所に電源をもち、なお非常の際の自家動力を備えるのが常である。

もし下淵以外の電源を備えるには、樫原変電所から受電するので、このためには 1000 kWh を新線により約 15 km 送電するよう設備せねばならない。これは諸種の

写真-1 圧気前縫地の間隙よりの漏水

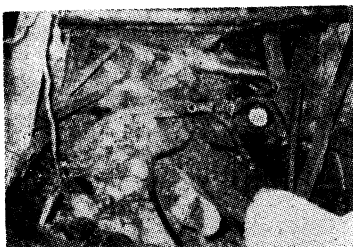


写真-2 圧気前、導坑切羽



(堆積するは湧水により押し出された砂礫、掘さく進行停止状態となる)

写真-3 導坑落盤状況



(5本のパイプはウエルポイントのライザーパイプである)

事情により困難であつたために、電源は従来の下淵変電所 1カ所として停電の際の動力はディーゼル発電によることとした。この増加動力 400 kWh の送電に耐えるように増備として、受電所の改修および電線 5 mm 単線を 2.6 mm 7本ヨリに取換えた。停電時は作業を中止して坑内空気圧を保持するために、100 lb/in² の空気圧縮機 75 HP 2台と 50 HP 1台をディーゼル発電機で運転した。

空気消費量は次の坑外設備の項でわかるように 400 HP の空気圧縮機でたりるが、もし消費量がはなはだしいときには空気圧縮機を増設する計画であつた。

(2) 坑外設備について 空気消費量については次式で求めた。

$$C = 12 \sim 24 D^2$$

ここに C: 空気量 (ft³/min), D: 掘さく直径 (ft)

上式により 1200~2400 ft³/min と推定されるから、400 HP (50 lb/in²) 空気圧縮機 1台を設備した。従つて坑外設備 (主として空気圧縮機) は次のとおりである。

表-1

機 械 名	動力	台数	目 的	摘 要
インガソルランド製 50 lb/in ² 400 HP	電動	1	圧 気 用	排気量 3500 ft ³ /min
三國重工製 100 lb/in ² 100 HP	電動	2	掘 さ く 用	排気量 495 ft ³ /min
本多機械製 100 lb/in ² 50 HP	電動	1	掘 さ く 用 (停電時は圧気用)	排気量 250 ft ³ /min
北越製 100 lb/in ² 75 HP	ディーゼル	2	停 電 時 圧 気 用	排気量 315 ft ³ /min
カミン製 50 kW 発 電 機	ディーゼル	1	停 電 時 排 水 お よ び 照 明 用	ポンプ 4 in (2 段) 2 台 3 in (2 段) 1 台 4 in 自給 1 台
カミン製 50 kW 発 電 機	ディーゼル	1	停 電 時 に 上 記 50 HP の 圧 縮 機 運 転 用	

・停電時に対しては 2@75 HP + 1@5 HP = 2×315 + 250 = 880 ft³/min の空気量を送る。また高圧管から低圧管へ切換えしうるように配管し、なお次の設備をした。

- a) 坑外ゲージ室に坑内空気室から 2 in 管を引いて圧力計を取付け、常に坑内空気室の圧力の変化を知るようにして空気室の圧力を一定に保つた。
- b) ゲージ室の低圧管に島津製作所製 MF 型電気式流量計 (30.6.8.より使用) を取付け送気量を測定した (図-4 参照)。

またこのほか治療気閥を設備したが幸いに一度も使用しなかつた。

(3) 坑内設備について

1) 隔壁について 隔壁の位置は地山の比較的によいところ、作業等を考へて 2号斜坑起点約 240 m の地点に定めた。隔壁はコンクリート、鋼製いずれにするか比較検討した結果、次の理由により鋼製とした。鋼製隔壁はわが国においては初めての試みである。

- a) トンネル断面が小さいから部材が小であり加工しやすい。
- b) 気閥を従事員用と材料用とに分けたため、突縁山

で鋼の破壊強度 4100 kg/cm^2 に対して十分である。

また管類については 図-3 のように予備低圧管 6 in のほかに予備管を通しておいた。

2) 気閘について 空気消費量を少なくするために、従事員気閘と材料気閘を別々に設備した。

設計圧力 20 lb/in^2 に対し従事員気閘は鉄 (厚さ 4.5 mm) に対して強度 157 kg/cm^2 、材料気閘は鉄 (厚さ 6.0 mm) に対して強度 235 kg/cm^2 で十分であるが、剛度を保たしめるために、鉄と山形鋼の継手には溶接を併用し、気閘の長さの方向に山形鋼の補剛材を用いた。また長さは従事員気閘は1交替 20 人を一度に入れうるように 9 m とし、材料気閘はズリ車 3 台を一度に入れうるように 9 m とした。

従事員気閘 鉄厚 4.5 mm 大きさ $\phi 100 \times 900 \text{ cm}$

材料気閘 鉄厚 6.0 mm 大きさ $\phi 200 \times 900 \text{ cm}$

5. 施工について

気閘の設備およびその背面のグラウト注入等を完了したので 30 年 5 月 15 日午前 9 時より徐々に送気を開始した。5 月 17 日 15 時には切羽の状態は天端および右側は乾き左側は濡れていたが、その崩壊カ所に施工した逆巻きコンクリート肩部中に、埋め込んでおいたグラウトパイプの水が消失したので坑内空気圧を 13 lb/in^2 に決定した。このときの空気消費量は空気圧縮機のアンローダーから推定すると (流量計は 6 月 8 日より使用)、 $1000 \sim 1200 \text{ ft}^3/\text{min}$ で水量は約 13 l/sec (送気直前は約 30 l/sec に減少) に減じた。

圧気工法の要諦は適当な空気圧で空気漏洩量をできるだけ少なくすることであり、そのために

- 導坑切羽と隔壁との距離は空気消費量と空気圧縮機の能力に応じてできるだけ縮める。
- 導坑切羽と切揚げとの距離はできるだけ縮める。
- 切揚げたらだちに覆工コンクリートを打つ。

この方針を守らなければ安全なかつ経済的的施工は困難である。この方針に従い坑内作業員 (隔壁より奥) は 1 日 3 交替 (1 交替は第 1 回作業時間 4 時間以内、坑外休憩 30 分以上、第 2 回作業時間 4 時間以内とした) とし作業を開始した。また断面が狭小のため掘さく日曇築日と分けて行い、1 日進行 3 m を目標とした。以下施工の概要を進行に従って述べる。

i) 2 号起点 350 m (圧気工法開始点) $\sim 380 \text{ m}$ まで: 最初は崩壊区間であり慎重に頂設導坑で進み 5 月 23 日には累計 13 m で地山に達し 6 月 11 日には逆巻コンクリートもこの地点に達した。

この間 5 月 25 日夜半より 30 日にかけて空気圧縮機のアンローダーが異状に働き、29 日の午後 3 時には推定 $2300 \text{ ft}^3/\text{min}$ に達したが、30 日午後 5 時には $1200 \text{ ft}^3/\text{min}$ に戻っておちついた。これはトンネル中心線より

り東方約 200 m 、施工基面より約 30 m 高い位置の小川の支流 (幅 1.5 m くらい) および、その横の水田に空気が噴出したためであり、この噴出はそのまま大きくなかなかつたが最後まで続いていた。

6 月 12 日より 364 m 付近 (この付近より地山) より掘さくする作業員も慣れてきたので導坑を底設で進めることとした。しかし堆積層の地質は均一でなく、2 号起点 $370 \sim 380 \text{ m}$ 間は微細砂で全然粘土を含まず、にじみでる水につれてどろどろと砂が流出してくるので鏡板を用いた。このときに圧力を 1 lb/in^2 上昇してみたが効果がなかつた。以後圧力は 14 lb/in^2 とした。

ii) 2 号起点 $380 \sim 850 \text{ m}$ 間: 6 月末 380 m 付近よりは地質も粘土交りの砂礫層となり、またこの層と粘土層とが互層となつてきたので導坑も天矢板のみで進められ、切揚げの丸型にも肌落防護程度の当板をし、土平側板はほとんど必要なくなつた。またコンクリートも一昼夜にセントル間隔 1.29 m を打設しようようになった。この地質は 850 m 付近まで続いた。もちろんときどき悪い所もあつたが短区間であつたので困難ではなかつた。空気消費量は $800 \text{ ft}^3/\text{min}$ 、水量も 760 m 付近より約 5 l/sec となつた。

iii) 2 号起点 $850 \sim 1010 \text{ m}$ 間: 870 m 付近 11 月下旬より砂礫層中の粘土が少くなり、また玉石が交つてきた。これは湖底から河底に移るように思われた。中割丸型にも汗をかき、矢板より水が浸り水溜りを生ずるようになって、土平側板も必要となつたために 16 lb/in^2 とした。覆工コンクリート中には水抜管 1 in をとところどころ埋め込んで施工した。この地質は 970 m 付近 (12 月末) まで続きその後は漸次よくなつた。

vi) 貫通点: この間 1 号斜坑は 10 月 10 日龍門礫層中で湧水しそうになつたので掘さくを中止し、覆工につとめ、11 月 16 日最後のコンクリートを打設し、切羽は鏡板を打ち支保工を補強した。従つてこの点は貫通点と決定し、2 号起点より導坑 1019.6 m 、覆工コンクリート

写真-7 圧気内セントル

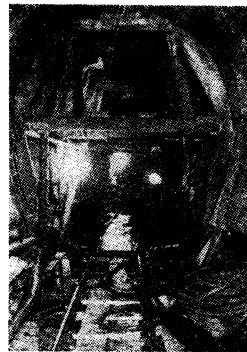


図-4 減圧開始地点略図

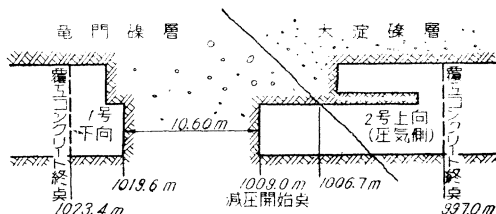
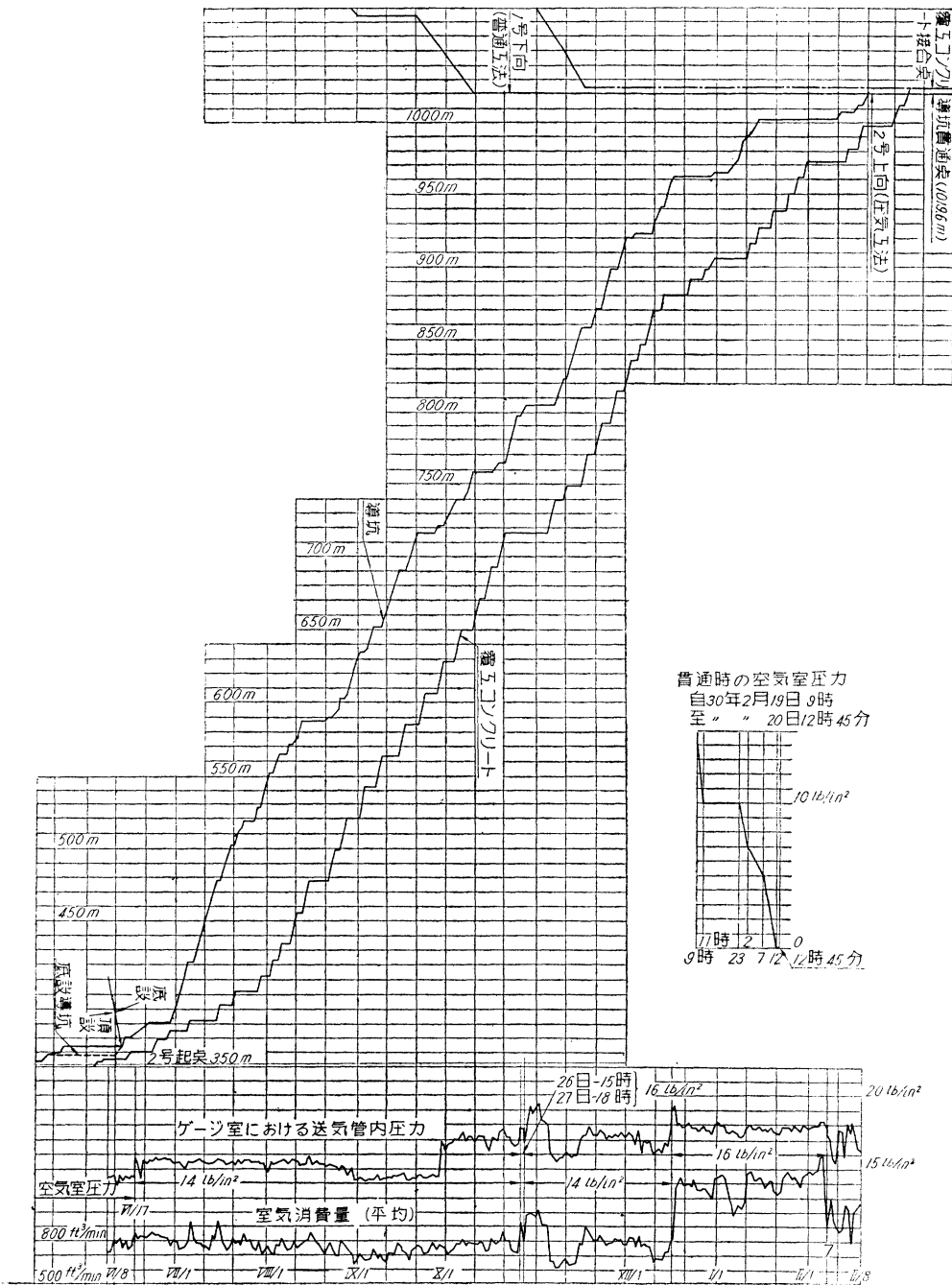


表-2

日 時	19 日 9 時	19 日 11 時	19 日 23 時	20 日 2 時	20 日 7 時	20 日 10 時	20 日 12 時	20 日 12 時 45 分
2号起点と導坑との距離	1009.00 m		1013.5		1016.9	1018.1	1018.5	1019.6
空気圧力	14 lb/in ²	10	10(予定7)	7	5	2	0	貫通

図-5 圧気工法工程図



トは 1023.4 m である。圧気工法区間は 669.0 m となった。

次に最後の貫通点の施工であるが、1号斜坑側の最奥部にコンクリート壁を作り、圧力下に貫通させる方法もあるが、当現場においては2号斜坑側の導坑が 1006.7 m (31年2月3日)にて龍門礫層に達し不透水であるために漸次減圧して、貫通の際には平圧でやる方法をとった。

貫通点付近の減圧は 31年2月19日 1009.0 m の地点から初めた。導坑進行と圧力の関係を 表-2 に示す。

すなわち 31年2月20日正午過ぎ圧気工法開始以来約 10 カ月ぶりに、事故なくまた潜函病の罹災者もなく予定どおり貫通し得たのである。

6. 施工を顧りみて

当初 4. において述べたとおりの設備をし、もし空気消費量が多ければ、400 HP 空気圧縮機を増設することを考慮して送気を開始したが、空気の漏洩が予想外に少なかった。これは砂礫層と粘土層が互層しているため、この粘土層によつて空気が漏れていくのが密閉されたためと思われる。

また送気開始 2 旬後、すなわち 6 月 7 日に予告停電があつた。そのときの坑内空気圧の降下は、次の結果であつた。表-3 は各時間帯における、運転空気圧縮機と空気圧 13 lb/in² から降下した圧力との関係である。

また 2 号起点 380 m 過ぎの砂礫層に粘土を含むよ^{*}

表-3

時 刻	時 8.00	時 9.30	時 12.00	時 13.00	時 16.00
400 HP 空気圧縮機 1 台					
100 HP 空気圧縮機 2 台			電 動		
50 HP 空気圧縮機 1 台		ジ ー ゼ ル	電 動	ジ ー ゼ ル	
75 HP 空気圧縮機 2 台	ジ ー ゼ ル	ジ ー ゼ ル		ジ ー ゼ ル	
同時運転空気圧縮機による排気量(ft ³ /min)	630	880	1 240	880	
13 lb/in ² に対する降下圧力(lb/in ²)	0.6 lb	0.7 lb	0	0.1 lb	

*になつた地質の所からは、粘土層に密閉された状態にあつたため、空気の消費量が予想外に少く、かつ設備した自家動力でも圧力降下を僅少に保てる好条件にあつたため、地質を探る目的で導坑を先進したが、切羽と切掛けとの距離は 100 m 以上にならないようにおさえた。ただし地質によりこの距離は 80~60 m におさえた所もあつた。また切掛けと覆工コンクリートとの距離は 30 m 以内におさえた。これはコンクリート打設がセントル間隔 1.2 m を 18 層、2 層夜通して行うためであつた。なお本地質は圧気により非常に安定化したので 図-3 のような部材で安全に支持することができた。

次に坑内空気圧と空気消費量については圧力が高ければ消費量が多くなるのは当然であり、かつ圧力が低いほど従事員の健康も良好であり、また坑内作業も長時間なしうる。

坑内空気圧はグラウト パイプ の水が消失したことによつて 13 lb/in² に決めたが、施工途中 14, 16 lb/in² に上昇したが、大した効果は認められなかつた。図-5 中 30 年 10 月 26~27 日に 16 lb/in² にしたのは、インバート コンクリートを打つために上昇したが、効果が現われなかつたので 14 lb/in² に戻した。坑内空気圧をさらに上昇すれば効果が明瞭となるかも知れないが、最後まで空気が地表へ噴出していたので 16 lb/in² 以上にす

ることはやめた。空気消費量についても前述のように予想外に少なくて 1000 ft³/min であり、掘さくが進行しても増加しなかつたので、空気圧縮機を増設、隔壁の移設については、いずれも必要なかつた。

7. 結 び

大和平野導水トンネル中第 1 号トンネルは圧気工法により予定工期で貫通した。これよりみて、今後山岳トンネルにおいても帯水層の構成、各層の水圧およびその透水性等の調査により、トンネル内の地質や湧水圧が知られば、この工法が可能な場合も多いと思われる。

本工法によれば施工は計画的に、また支保工も節約され、経済的にも必ずしも不利でないと思われ、この種トンネルにおいても、場合によつて、圧気工法は推奨されるべきものといえよう。

最後に農林省の委嘱により地質ならびに施工に対して御教示をいただいた、京都大学 松下 進教授、同 村山 朔郎教授、ピー・エス・コンクリート KK 平山復二郎氏、東洋商事 KK 佐藤周一郎氏、および再三の助言をいただいた国鉄技師 小竹秀雄氏に、謝意を表するとともに、農林省当局より終始御鞭撻下さつたことをここに厚く感謝する次第である。