

地下タンク設置に伴う地下水位変化の検討
(Numerical Simulation on Variation of Groundwater Level Affected Storage Cavern of Fuel)

(財)電力中央研究所 正 員 田中伸和
" " 安芸周一

1. はじめに

燃料貯蔵の一環として、岩盤の地下水中に無巻き立ての燃料貯蔵用空洞を埋設し、空洞内への地下水浸透により岩盤内への油の浸透を防御しようとする「水封式燃料地下貯蔵方式」¹⁾は、すでに欧米諸国で採用されており、安全で経済的な貯蔵方式の1つと考えられている。わが国でも、現在、石油公団によってその実証のためのプラント建設が愛媛県菊間町において進められている。

この方式の最大の特徴は貯蔵槽（以下、地下タンクあるいはタンクと呼ぶ）を地下水位以下に掘削し、タンク内圧を周辺地下水圧より低く保つことにより、タンク内へ地下水を湧出させ、この湧出作用によってタンク内の原油等の岩盤中への浸透を抑えることである。なお、湧出した地下水は、タンクから揚水された後、ろ過され、外部へ排水される。

しかし、湧水量が多ければ、周辺の地下水環境に地下水位低下等の影響を及ぼすことが考えられる。とくに、タンクは貯蔵に便利のように、孤島や海岸線付近に設置されるであろうから、その影響は淡水のみならず、海水にも及び、地下タンクの設置・運転に伴い、井戸の枯渇や塩水化が予想される。そのため、生活環境の保全の立場から、これらの変化を未然に予測し、対処する最善策を検討しておく必要がある。

ここでは、このような地下タンクの設置に伴う周辺地下水と広域的な地下水位の変化の予測モデルを示すとともに、そのモデルを適用することにより、海上の孤島に地下タンクを設置した場合の具体的な地下水位変化を数値計算により検討した。なお、地下水位の低下の著しい場合の対応策としてはタンク上部より補給水を買入させる地下水涵養法（いわゆる、水封トンネル）があるが、今回はその効果については省略した。

2. 解析手法

地下タンク設置に伴う広域的な地下水位の変化の検討は、図-1に示すように、タンク周辺での局所的な検討とそれよりも広い範囲を含む広域的な検討とに分離して行なった。

まず、タンクの形状、配置、タンク設置域周辺の地質分布、地形、ならびに水文量を考慮して、タンク周辺の地下水流動、地下水位変化、ならびにタンク内への湧水量を鉛直方向の流速成分をも加味した3次元（あるいは、タンクの長手方向の流動が無視できる場合には、鉛直2次元）モデルで解析する。得られたタンク周辺の地下水流動ならびに地下水位変化を評価し、これらの変化が著しい場合には、その対応策を施す。また、タンク内への湧水量をタンクと等

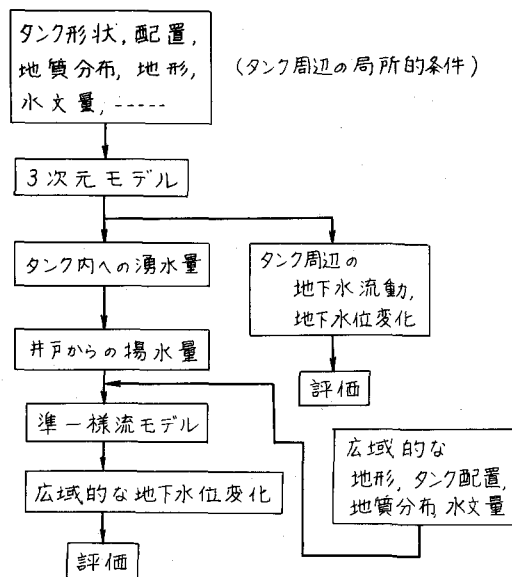


図-1 地下タンク設置に伴う地下水位変化の解析手順

価な断面積を有する井戸からの揚水量とみなして、鉛直方向の流速成分を無視した準一様流モデルにより、広域的な地下水位変化を検討し、評価する。

モデルの基本式は、ダルシー則と質量保存則、ならびに水粒子の運動学的条件式から導き、3次元モデルと準一様流モデルそれぞれに対し、以下の通りとする。なお、準一様流モデルは単層に対するものである。

(1) 3次元モデル

$$\textcircled{1} \quad \frac{\partial}{\partial x} (K_{xf} \frac{\partial h_f}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yf} \frac{\partial h_f}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zf} \frac{\partial h_f}{\partial z}) + Q = 0 \quad (\text{淡水層内の地下水の質量保存則})$$

$$\textcircled{2} \quad \frac{\partial}{\partial x} (K_{xs} \frac{\partial h_s}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{ys} \frac{\partial h_s}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zs} \frac{\partial h_s}{\partial z}) = 0 \quad (\text{塩水層内の " " "})$$

$$\textcircled{3} \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} + u_{sf} \frac{\partial \eta}{\partial x} + v_{sf} \frac{\partial \eta}{\partial y} = w_{sf} \quad (\text{淡水位に関する運動学的条件式})$$

$$\textcircled{4} \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} + u_{ss} \frac{\partial \xi}{\partial y} + v_{ss} \frac{\partial \xi}{\partial y} = w_{ss} \quad (\text{塩水位に " " "})$$

(2) 準一様流モデル

$$\textcircled{5} \quad \lambda \frac{\partial \eta}{\partial t} = \bar{K}_x \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 + \bar{K}_y \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 + (\eta - \eta_b) \left(\bar{K}_x \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \bar{K}_y \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) + q$$

(地下水位に関する連続式)

ここで、 K_x 、 K_y 、 K_z はそれぞれx、y、z軸(z軸は鉛直方向)方向の透水係数、 h はピエゾ水頭、 η 、 ξ はそれぞれ地下水位と淡塩境界面の高さ、 u_s 、 v_s 、 w_s はそれぞれx、y、z軸方向の地下水面あるいは淡塩境界面での流速成分、 λ は岩盤の空隙率、 η_b は下部不透水層の高さ、 $\bar{K}_x$ 、 $\bar{K}_y$ はそれぞれx、y軸方向透水係数の鉛直平均値であり、添字f、sはそれぞれ淡水と塩水での値を表わす。また、 Q は岩盤内での淡水の発生率であり、 q は地表面からの雨水涵養量である。

3. 海上の孤島に地下タンクを設置した場合の地下水変化の検討

海上の孤島に地下タンクを設置した場合には、タンク周辺の地下水変化のみならず、島全体の広域的な地下水位の低下、ならびに海側からの海水のタンクの方への接近等が予想される。そのため、これらの変化を具体的な地点において検討し、検討結果を以下に述べる。

なお、対象とした地点は図-2に示す孤島であり、南北約3km、東西約1km、最大標高約150mの瀬戸内海の孤島である。

(1) タンク内への湧水量と海水の接近量

(a) タンク1基を海岸線に平行に設置した場合

まず、十分な長さをもつタンクを1基海岸線に平行に設置した場合を想定し、タンク長手方向の地下水流動を無視して鉛直2次元断面内での地下水流動の解析により、タンク内への湧水量ならびに海水の接近量について概略的に評価する。なお、計算に当っては、島の西半分を対象とし、山頂部直下で地下水流動が対称となるものとみなした。

タンクは20m×20mの断面で海岸線より20mの山側の海水面下60mの位置に設置され、内圧は大気圧上2.5kg/cm²に保たれるものと仮定した。また、当該する孤島での代表的横断面における透水係数の分布をボーリング試験による実測をもとにして描いたものが、図-3である。すなわち、全般的に岩質は良好で、地表面下30～40

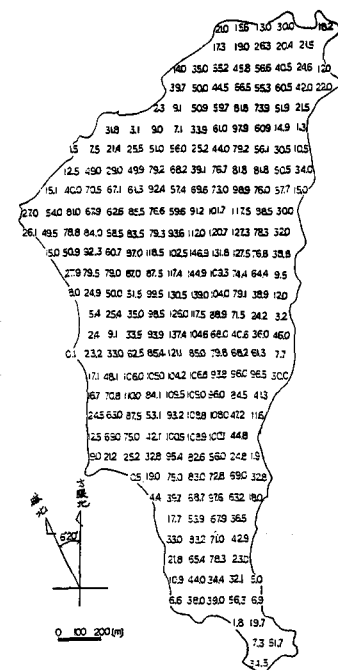


図-2 検討の対象とした孤島

mまでは 10^{-5} cm/sec以上の大きさをもち透水係数であり、それ以深では 10^{-5} cm/sec以下の値であった。そのため、ここでは簡単のため、空隙率および透水係数は島のすべての場所で全方向に対し同一とし、それぞれ5%, 10^{-6} cm/secと仮定した。また、地表面からの雨水涵養量としては、これまでの考察⁴⁾より、単位面積あたり、0.25 mm/dayとした。

以上の条件のもとで、①～④式を連立させて数値解析し、その結果⁵⁾地下タンク設置に伴い山側での地下水位は50年間でタンク設置前より約7 m低下することが認められた。さらに、海水は約15 mだけタンクの方へ接近するにすぎなく、海岸線よりも陸側への侵入は認められなかった。

また、タンク内への湧水量は、50年間ほぼ一定で単位長さのタンク当たり約70 l/secであった。

(b) タンクを海岸線に直角に設置した場合

地下タンクの実際の設計に当っては、10万 m^3 クラスの貯槽を10基程度同一地域に設置されるであろう。すなわち、図-4に示すようにタンクは貯蔵に便利ようにほぼそれらを海岸線に直角に配置するように考えられている。そのため、このように配置されたタンク周辺の地下水変化、ならびにタンク内への湧水量をタンクを含む3次元での地下水解析で検討した。タンクは20 m × 20 mの断面積をもつ長さ250 mで、海水面下60 mの所の海岸線から20 mの距離に設置した場合を想定した。なお、タンク内圧、透水係数、地形は(a)の場合と同一とした。また、計算境界ではタンクとタンク間の中央で地下水流動が対称となる条件を用いた。なお、タンク間距離は80 mである。

その結果得られた地下タンク設置後50年での地下水流動と水面変化を図-5に示す。すなわち、この場合には、山頂部をはじめタンク直上にいたる全般的な地下水位は約100 mにも及ぶ著しい低下が認められた。しかしながら、海水の接近は約10 m程度であり、(a)の場合にくらべ若干すくなくなった。

また、タンク1基当たりへの湧水量の時間的変化を図-6に示す。すなわち、湧水量はタンク設置当初で多く、平均的には約10 m^3 /dayである。なお、同図には単位長さ当

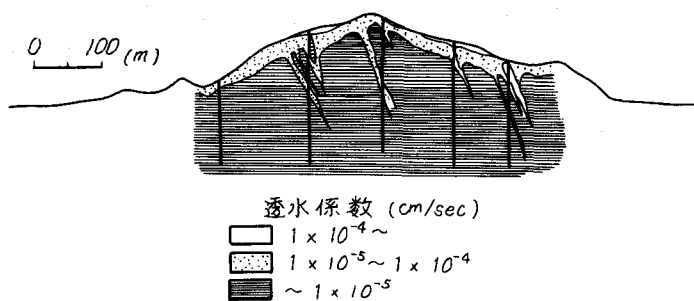


図-3 代表的横断面での透水係数分布

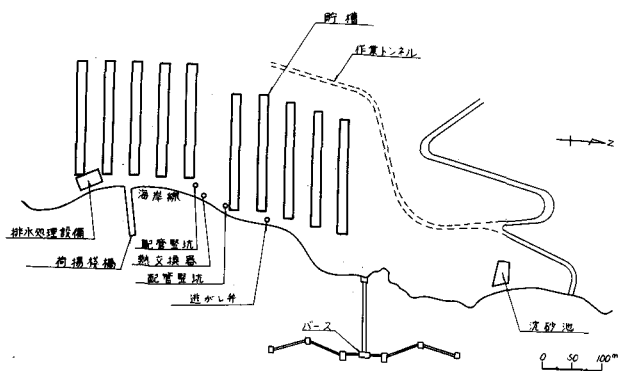


図-4 貯槽配置での概略例

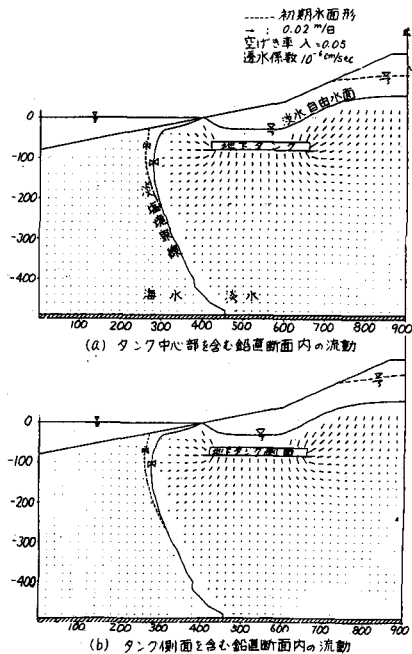


図-5 50年後の地下水流動

りのタンクへの湧水量を()内で示したが、約 40 l/day/m と、(a)の場合にくらべ減少がみられた。

(2) 島全域での地下水位変化

以上のように、今回対象とした孤島においては、比較的山側での地下水位が高いため、海水はかなり海側へ押しもどされているものと思われる。このことは海岸線に近いボーリング孔内での塩分濃度測定からも検証されている。

また、地下水の海水をも考慮した3次元解析によっても海水の接近は地下タンク設置後50年間程度では約 $10 \sim 15 \text{ m}$ であり、タンク設置に伴い海水が海岸線よりも陸側へ浸入することは認められなかった。そのため、地下タンク設置に伴う島全域での地下水位変化を地下タンクの平面配置と合わせて検討するに当たっては、海水の海岸線よりも陸側への浸入は無視し、淡水のみにより検討することが可能と思われる。したがって、準一様流モデルは淡水位のみに対して用いることとした。

(a) タンク1基を海岸線に平行に設置した場合

検討の一例として、図-2に示す孤島に対し、その南西部に $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ の断面をもつ長さ 250 m (容量: 10 万 m^3) の地下タンク1基を海岸線に平行に設置した場合を想定し、その設置に伴う島全体での地下水位変化を検討した。

すなわち、(1)-(a)での検討より単位長さ当りのタンクへの湧出量が約 70 l/day であったので、ここでは⑤式の q として、タンク直上域とタンク直上以外では、それぞれ以下のように入れた。

◎ タンク直上域

$$q = (\text{雨水涵養量}) - \frac{(\text{タンク内への湧水量})}{(\text{タンク上部表面積})}$$

◎ タンク直上以外

$$q = (\text{雨水涵養量})$$

なお、今回の場合は、雨水涵養量として 0.25 mm/day と仮定したので、それぞれの区域での q の値は、それぞれ -2.25 mm/day 、 0.25 mm/day となる。

このような条件のもとで⑤式を数値解析して得られた地下タンク設置後50年におけるタンク設置前の地下水面からの地下水位の低下量を図-7に示す。また、図-7に示す④、⑤両地点でのタンク設置後の地下水位の経年変化をそれぞれ、図-8、9に示す。

その結果、ここで想定したような地下タンクの設置に対しては、それに伴う周辺地下水の変化は顕著ではなく、設置後50年においても地下水位低下量は最大数 m であり、 1 m

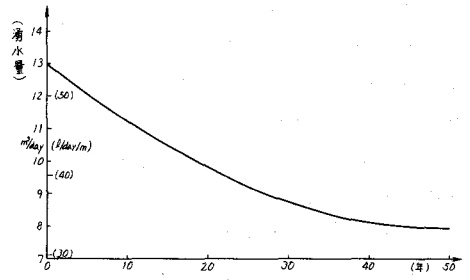


図-6 湧水量の時間変化

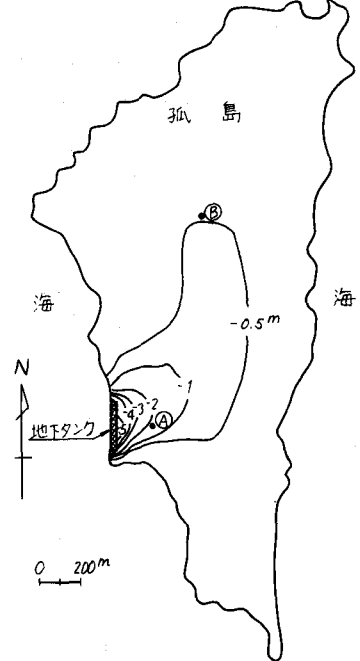


図-7 地下タンク設置後50年での地下水位低下量 (m)

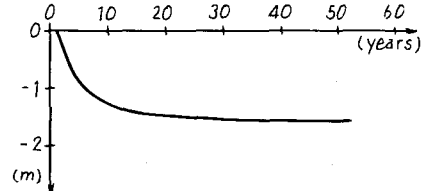


図-8 地下タンク設置に伴う地点④での地下水位変化

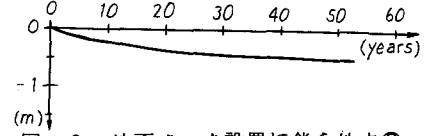


図-9 地下タンク設置に伴う地点⑤での地下水位変化

以上の低下の及ぶ範囲はタンクから約300m以内にすぎなかった。

なお、タンク設置前の島全域での地下水流動と地下水位分布は、⑤式の定常解より求め、雨水涵養量を 0.25mm/day 、空隙率を5%、および下部不透水層の位置は海水面下500mとした場合に対し、それぞれ、図-10、11のようになった。すなわち、島の地下水はほぼ島の高所から放射状に海側へ流れ、海岸線から海へ流出していることがわかる。また、⑤式の定常解から求まる最大地下水位は約50mであり、3次元モデルから求まる最大地下水位が約100mであったのにくらべて約1/2であった。

(b) タンク10基を海岸線に直角に設置した場合

つづいて、実際のタンク配置に適用するため、図-2の孤島にタンクの断面が $20\text{m} \times 20\text{m}$ 、長さが250mの容量10万 m^3 クラスのタンクを10基海岸線上直角に配置された場合を想定し、タンク設置に伴う島全域での地下水位変化を検討した。

すなわち、(1)-(b)での検討より、10万 m^3 のタンク1基当りへの湧水量が約 $10\text{m}^3/\text{day}$ であったので、この場合⑤式の q としてはタンク直上域ならびにタンク以外に対して、それぞれ、 -1.75mm/day 、 0.25mm/day を与えた。なお、タンク間の距離は80mとした。さらに、タンクは島の南東部および北東部の海岸線沿いに設置された場合を想定した。

このような条件のもとで⑤式を数値解析して得られた地下タンク設置後50年におけるタンク設置前の地下水面からの低下量を、島の南東部および北東部の設置に対し、それぞれ、図-12、13に示す。

その結果、島の南東部に設置した場合には、地下水位の低下する範囲はほとんど島の南半分に限られ、タンク設置前より1m以上の低下の及ぶ範囲は、タンクから約1km以内であった。また、島の北東部に設置した場合には、地下水位の低下は島の北部から中央に及び、タンク設置前より1m以上の低下の及ぶ範囲はタンクから約800m以内であることがわかった。

4. 3次元モデルと準一様流モデルとの比較

前述したように3次元モデルと同一の透水係数、空隙率、雨水涵養量の値を用いた場合においても、準一様流モデルから求まる最大地下水位は3次元モデルのものよりきわめて小さい値を示した。このことは、今回の3次元モデルによる解析は地形を島の半分に限ったため、地下水の流れは山頂部から海岸線へ向う一方向的となるためと思われる。一方、準一様流モデルによる解析では、島全体の標高と海岸線を用いたため、準一様流モデルから求まる地下水の流れは図-8に示すように島の高所から放射状に海岸線方向へ向うものとなっている。そのため、両モデルから求まる最大地下水位に

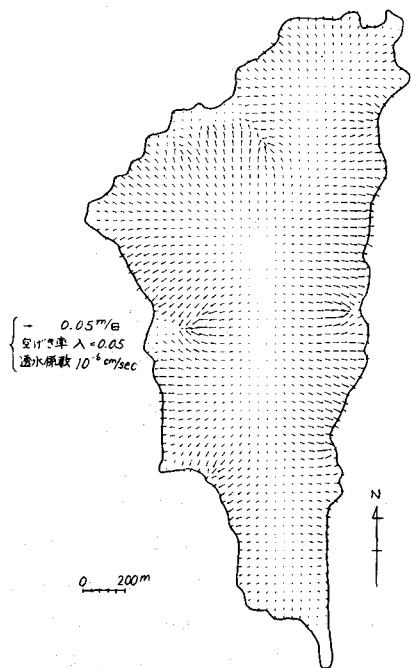


図-10 タンク設置前の地下水流動

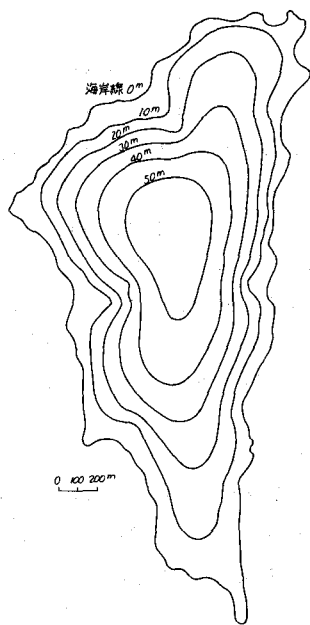


図-11 タンク設置前の地下水位分布

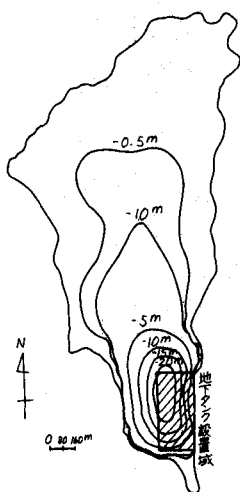


図-12 設置後50年での地下水位低下量
(島の南東部に設置した場合)

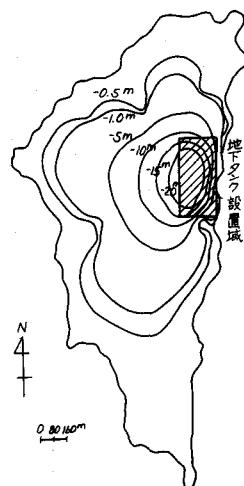


図-13 設置後50年での地下水位低下量
(島の北東部に設置した場合)

差異が存在するようになるものと思われる。

図-2の孤島を対象にして、⑤式の定常解から求まる最大地下水位を雨水涵養量と透水係数の比をパラメータとして求めたが、⑤式の定常解から求まる最大地下水位が3次元モデルのものと同程度となるのは、⑤式の解析において透水係数を約半分にするか、あるいは、雨水涵養量を約2倍にする場合であった。

5. まとめ

以上、水封式燃料地下貯蔵タンクの設置計画に対して数値解析によりタンク設置に伴う地下水流動、ならびに地下水位変化の検討を行なった。その結果、以下のような知見が得られた。

(1) 対象とした孤島の岩盤中の海側から陸側への海水の浸入は、タンク設置後50年程度では生じないものと思われる。

(2) 地下タンク設置に伴う地下水位の低下の及ぶ範囲は、タンク設置後50年ではそれほど広くはならないものと予想される。

(3) 10万 m^3 クラスのタンク1基に対する湧出量は今回の岩質程度であれば、約10 m^3/day となろう。

(4) 10万 m^3 クラスのタンクを連続して海岸線に直角に設置する場合には、タンク周辺でかなり大きな地下水位低下を示すものと思われるため、水封トンネル等の地下水位保持の方策を施すべきであろう。

6. 参考文献

- 1) 電気事業連合会・燃料地下タンク研究委員会：水封式燃料施設技術指針，昭和55年4月
- 2) 田中伸和・安芸周一：燃料地下タンクの技術開発に関する研究－水封式地下貯蔵にともなう周辺地下水位変化の検討（その1）－，電力中央研究所 土木技術研究所 研究報告 Ⅱ 379006，昭和54年7月
- 3) Shimada, J., Momota, H., and Ono, Y.: Role of Groundwater in the Bedrock for Underground Oil Storage - A Hydrological Case Study of Small Granite Island -, Rockstore '80, 1980
- 4) 田中伸和・安芸周一：孤島における淡塩地下水の検討，第24回水理講演会論文集，1980.2
- 5) 田中伸和・安芸周一：地下タンク設置に伴う淡塩地下水変化の検討，第35回年講，Ⅱ-282，1980.9