

特 集

海洋エネルギー利用技術

沿岸固定式波力発電システム

The Shore Fixed Type Air Turbine Wave Power Converter System

平本 嵩*・竹内 孝行**

Akira Hiramoto, Takayuki Takeuchi

1. まえがき

波エネルギー利用に関して、一次変換装置の分類は、エネルギー伝達の媒体に着目してみると、機械力発生装置、圧力発生装置および波浪ダム装置に大別できる。

機械力発生装置は、浮体や受圧板などの動揺により波エネルギーを機械力に変換する方式であり、大変効率は良いが、過大な波の力が不規則かつ直接作用するので、その耐波浪性を高めるために多大な費用を要する難点もっている。

波浪ダム装置は、越波堤を越した海水をダムに蓄積し、低落差タービンを駆動するものであり、エネルギー蓄積の面からは大変望ましいシステムであるが、収れん堤、波レンズダムなど大規模な構造物を付加しなければならず、他の近隣の環境を著しく変更することになる。

空気圧力発生装置は、海面の上下運動を利用して、海面上の空気室内空気を吸入・排出させ、この空気流で空気タービンを駆動する方式であり、圧縮性をもつ空気を介して機械類が作動するために、堅牢性・信頼性もっているが、効率が他方式に比較して若干下まわる。

また、一次変換装置は、その設置方式により浮体式と固定式とに分けられる。

浮体式は、航路標識ブイ用電源や海洋科学技術センターが山形県由良沖で海上実験を行った波力発電船「海明」にみられるような、沖合に浮かべ、係留によって海底へ固定するものである。この方式は、波の向きに対し自由度があるので、常に効率良く波エネルギーを吸収できる反面、時化の波浪中における係留の問題や、発生した電力を陸上まで送電する海中ケーブルの繰り返し疲労の問題などがある。

固定式は、これらに対する危惧から、沿岸固定式の波力発電としての研究が海洋産業研究会や運輸省港湾技術研究所で開始され、防波堤に空気室を組み込んだものとして提唱されている。また、空気室を防波堤に組み込まず、天然の岩場を利用して設置するものとして、新技術開発事業団が着手し、昭和58年から昭和59年にかけて、山形県鶴岡市で実海域実験が行われた。

この開発は、三井造船株式会社と富士電機株式会社が委託を受け、全体計画を海洋科学技術センターが担当し、空気室の設計、製作、据付を三井造船が担当し、タービン発電機の設計、製作、据付を富士電機が担当し、実験、計測を上記3社が共同で行った。

本論文では、波エネルギー利用に関し、沿岸固定式を中心とした波力発電装置について紹介する。

2. 沿岸固定式波力発電システム

2.1 システムの概要

新技術開発事業団の委託開発で実海域実験が行われた沿岸固定式波力発電装置は、山形県鶴岡市三瀬立岩地区の岩礁を利用して設置された。図-1に設置場所の概略図を示す。設置場所における水深は約3mであり、西北西に湾口を開いた入り江の奥となっているため、冬期の波は、この湾口をほぼまっすぐに進行し、装置に正面から入射する状態となる。

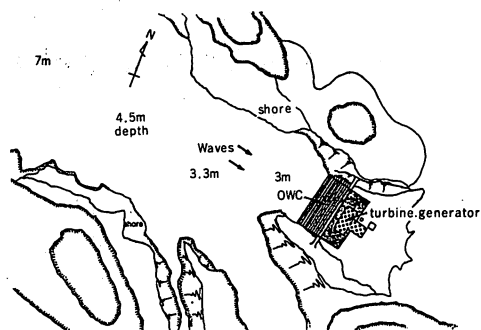


図-1 設置場所

* 富士電機防衛特機技術部

〒100 東京都千代田区有楽町1-12-1 (新有楽町ビル)

** 富士電機防衛特機技術部

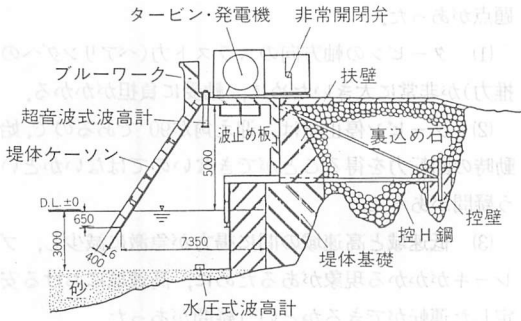


図-2 沿岸固定式波力発電装置の断面図(1)

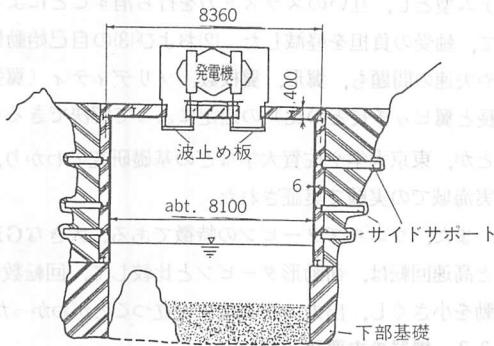


図-3 沿岸固定式波力発電装置断面図(2)

空気室は、入り江になった自然地形を利用して設置された。構造は図-2および図-3に示すような鋼製ケーソンとコンクリートから成るハイブリッド構造であり、空気室の上にタービン発電装置が設置された。内寸法は、幅約8.1 m、高さ約5 m、静水面奥行約7 m、空気室面積約50 m²である。図-4に完成された波力発電システムの外観図を示す。

波が空気室へ入射すると、空気室内の波面が上下動し、空気圧を変動させる。空気圧が上昇すると、空気室天端に設けられた開孔部から空気が吹出し、空気圧が低下すると、外気側から空気室へ空気が吸入される。この空気の往復流によってタービンを回転させるとともに発電機を回転させて発電する。この方式は、振動水柱型空気タービン方式と呼ばれている。

空気タービンは、ウエルズタービンを使用した。このタービンは、翼断面が対称形の翼形をもっているため、空気流の方向が空気室と外気側とで往復する流れになっても同一方向に回転する特殊なタービンである。従って、従来の衝動形タービンにおいて必要とした、空気流を一方向とするための整流弁が不要となった。しかし、ウエルズタービンには、後述するような未知の解決すべき問題点がある。そのうちの1つに、ター

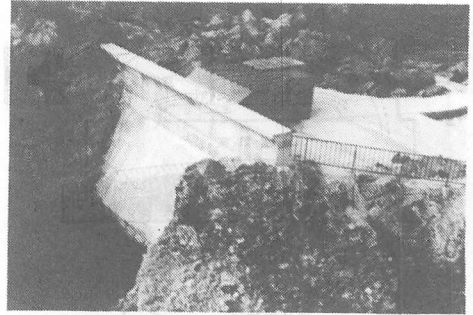


図-4 波力発電システム外観

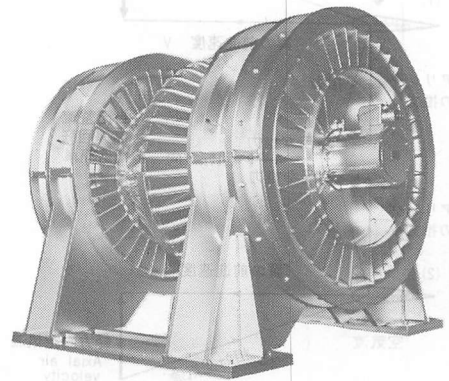


図-5 タービン発電機外観

ビン軸方向のスラスト力の過大なことがあり、軸受に負担をかける恐れがある。この解決のために、発電機軸を両軸とし、発電機の両側にタービンを配置して、互いのスラスト力を打ち消すようにした。

発電機は、定格40kW(最大60kW)、定格回転数1,792 rpmの全閉自冷形の同期発電機を採用した。また、タービンを支持する軸受と発電機の軸受を兼用させ、発電機本体は、タービンの静翼(ガイドベーン)を兼ねたタービンハウジングによって支持される。発電機の出力電圧は、AC 200 Vを一定に出力するよう制御されている。図-5にタービン発電機の外観を示す。

負荷装置は、屋外自然冷却式シーズ抵抗器を用い、3kWごとに負荷容量を切替によって増減できる。従って発電した電気エネルギーは全て熱エネルギーとして消費されることになる。

本システムの保安装置には、非常用開閉弁と圧抜き弁とがある。非常用開閉弁は、荒天時に発電機回転数が安全運転範囲を越えないように、空気流をしゃ断するものである。また、圧抜き弁は、この空気流しゃ断のために、空気圧力が異常に高くなることを防止するためのもので、いずれも遠方からの動作指令で開閉することができる。

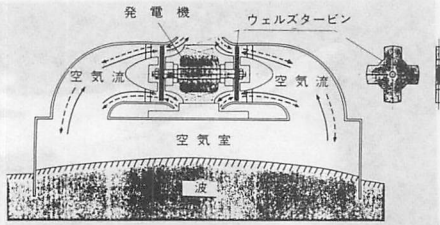


図-6 (a)原理図

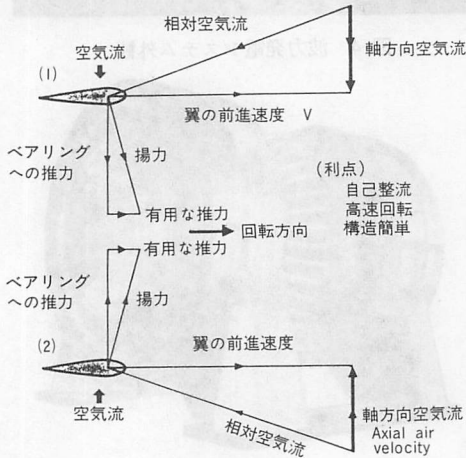


図-6 (b)原理図

タービン発電装置の運転は、監視員が発電機の回転数を見ながら、回転数が上昇の傾向にある時は抵抗負荷を増し、回転数が下降の傾向にある時は、抵抗負荷を減らすような運転をする。これらは手動切替で行われるが、回転数範囲によって決められた抵抗負荷へ強制的に切替る自動運転も可能である。手動でも自動運転でも、 $N < 700 \text{ rpm}$ 、あるいは $N > 2,674 \text{ rpm}$ の時は、自動的に無負荷となる。また、 $N > 2,260 \text{ rpm}$ の時は、自動的に、非常用開閉弁が閉鎖することとなる。

2.2 原理

タンデム型ウェルズタービンを使った発電装置の原理を図-6(a)に示す。

波の上下運動は、空気室の空気を圧縮あるいは膨張させる。圧縮時は、空気が空気室から外気側へ流れ(実線)、膨張時は、空気が外気側から空気室へ流れる(点線)ような往復する空気流となる。一方、ウェルズタービンは、翼断面が対称なために、空気流がどちら方向になっても同じ方向の推力成分をもち、従って同じ方向に回転する(図-6(b))。タービンの回転力は発電機を回転し、電気エネルギーとして取り出すことになる。

ウェルズタービンは、対称翼形なるがゆえに次の問

題点があった。

(1) タービンの軸方向のスラスト力(ベアリングへの推力)が非常に大きいために、軸受に負担がかかる。

(2) タービン停止時は、迎え角が 90° であるので、始動時の回転力を得ることができないのではないかとこの疑問があった。

(3) 低速域と高速域の間に揚力が急激に減少し、ブレーキがかかる現象があるために、高速域における安定した運転ができるかという疑問があった。

(1)に関して、2台のタービンを同軸で連結したタンデム型とし、互いのスラスト力を打ち消すことによって、軸受の負担を軽減した。(2)および(3)の自己始動性や失速の問題も、翼形、翼枚数、ソリディティ(翼弦長と翼ピッチ長との比)の選定によって解決できることが、東京大学や佐賀大学などの基礎研究でわかり、実海域での実験で実証された。

また、ウェルズタービンの特徴である、大きな GD^2 と高速回転は、衝動形タービンと比較して、回転数変動を小さくし、出力の平滑化に役立つことがわかった。

2.3 機器の主要諸元

(1) 空気室

最大設計波高：12.44 m

設計周期：13.5 秒

波圧力：約 94.5 ton/m

前面壁全体の波圧力：約 800 ton

揚圧力：約 54.6 ton/m

前面壁の傾斜：約 35°

水没深さ：-0.65 m

(2) 空気タービン

翼形状：NACA 0021

翼枚数：16

翼材質：耐蝕ステンレス鋼

チップ直径：1,337 mm

ハブ直径：1,000 mm

弦長：162.5 mm

ソリディティ：0.62

最大回転数：2,674 rpm

(3) 発電機

形式：屋外全閉形同期発電機

定格出力：40kW (max60kW)

定格回転数：1,792 rpm

回転数範囲：700 ~ 2,260 rpm

定格周波数：89.6 Hz

周波数範囲：35 ~ 113 Hz

定格出力電圧：AC 200 V

極 数：6 P

(4) 負 荷 装 置

形 式：屋外自然冷却式シーズ抵抗器

定 格 電 圧：AC 200 V

定 格 容 量：1.5 kW × 1, 3 kW × 1
6 kW × 3, 12 kW × 2

相 数：3 相

(5) 付 属 装 置

回転数検出器

手動ブレーキ

始動用電動機

(6) 保 安 装 置

非常用開閉弁

圧 抜 き 弁

2.4 運 転 方 法

空気室において、波エネルギーから変換された空気圧力は、タービン発電機を駆動する入力となる。この入力、波浪の変化に伴い変動するので、エネルギーを貯蔵しない限り制御することはできない。しかし、タービン発電機の出力容量は、最終需要家の負荷によるので、入出力のエネルギーバランスがとれないことになる。従って、エネルギー収支は、タービン発電機の回転エネルギーとして、貯え、放出される。例えば、出力に対し、入力が大きい時は、タービン発電機は加速され、入力が小さい時は減速する。入力の変動周期が短ければ、タービン発電機のGD²の大きさが小さければ、出力変動も大きくなるが、適当な大きさのGD²をもたせることによって、この出力変動を小さくおさえることができる。

負荷には、1.5 kW、あるいは3 kWごとに増減設定ができる抵抗器を使用した。発電機の出力電圧は、回転数が変動しても200 V一定になるように制御しているので、抵抗器の設定を変えない限り、一定の負荷運転ができるようになっている。従って、波浪状況に比較して負荷抵抗が小さい(入力>出力)の時は、タービン発電機は加速されていくので、負荷を増していき、入力=出力へもっていくことが最適運転となる。

タービン発電機が高速領域の安定回転数(>700rpm)になって負荷を接続し、入力の大きさによって斬次抵抗値を上げることになる。入力が大きく、回転数が運転領域を逸脱した時(> 2,260 rpm)は、非常開閉弁を閉鎖する。

3. 実海域実験結果

3.1 波浪状況

外海の波高は、11月中旬より急に高くなり、11月18日には、有義波高7.3m、最大波高11.3mを記録した。空気室への入射波は、空気室設置場所の水深が3mと浅かったため、浅海変形、砕波により、更に波の向きによっては、入江の両岸への衝突により、波形は大きく崩れ、波高も沖合に比較して大きく減衰しているのが目視観測された。

3.2 空気圧力

空気室で発生する空気圧力は、正圧力(寄せ波：上昇波)の方が負圧力(引き波：下降波)より相対的に大きくなる。破碎帯における波の粒子速度は、寄せ波の時、短時間ではあるが大きく、引き波の時は、小さいけれども長く続くと言われていることから、この発生圧力の形状を説明することができる。

3.3 起動特性

ウエルズタービンの自己起動性については、かなり低い波高からでも回転を開始し、波高0.7m付近になると高速領域へ移行し、良好な運転ができ、万一をおもって準備した始動用電動機を必要としなかった。

3.4 タービン発電機の回転数および出力特性

図-7に示すように、タービン発電機の回転数は、入

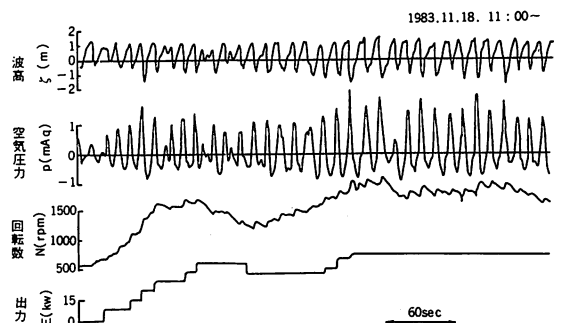


図-7 計測データ例

表 1 月別平均有義波浪と平均発電出力

年	月	平均 1 / 3 有義波浪		平均発電出力 (kW)
		周期(秒)	波高(m)	
1983	10	6.5	1.4	8.8
	11	6.8	1.6	13.7
	12	7.3	2.2	17.4
1984	1	7.3	2.2	12.8
	2	6.9	2.1	9.5
	3	6.6	1.7	5.4
総平均		6.9	1.8	11.3

射してくる波の一波一波に対して約50rpmほど変動するのみであるが、群波に対しては大きく変動する。

発電電圧は常に200V一定に保たれており、これより、従来の衝動型タービンに比べ、発電出力の平滑化については、かなり改善されていると考えられる。

表1に、計測期間中の月別および総合の平均有義波浪と平均発電出力を示す。

3.5 タービン発電機の効率

タービン発電機の効率は、発電出力が増大するに従い向上し、15~35kW出力時で50%強の値となり、それ以上の出力では、寄せ波時の波高の頭打ち現象のために効率として低減傾向にある。また、本装置の沖合の波エネルギーに対する総合効率としては、約11%となることが確認された。

4. 沿岸における波エネルギーの利用

現在、化石燃料、特に石油のコストが低く、これによる発電電力コストが低いために、波エネルギーの利用は、不利といわざるを得ないが、次の条件を満たす地域においては、十分波エネルギーの利用が考えられると言える。

- (1) 季節風、低気圧の通過、岬の先端などで、波エネルギーが豊富な場所
- (2) 波エネルギーが年間を通して安定している場所
- (3) 波エネルギーの季節変動と需要の季節変動が一致している地域
- (4) 石油への依存度が高く、かつその輸送費が高つく地域
- (5) 離島などの火力発電所で、規模が小さく、発電単価が高つく地域
- (6) 化石燃料の消費量が多く、自然環境への悪影響がある地域
- (7) 電力送電線などの布設工事費が高つく地域

以上のことを考えると、離島の他、ローカル的に消費する負荷のためのエネルギーとして、波エネルギーを利用することが考えられる。さらに、防波堤や護岸堤を波力発電ケーソン(空気室)と兼ねさせることによって、一つの機能当たりのコストを低減させることができるので、さらに利用度が多くなるものとする。

その時、波エネルギーを利用するものとして次のものが考えられる。

4.1 電力利用タイプ

(1) 離島用電源

離島においては、前述の条件がかなり満たされてい

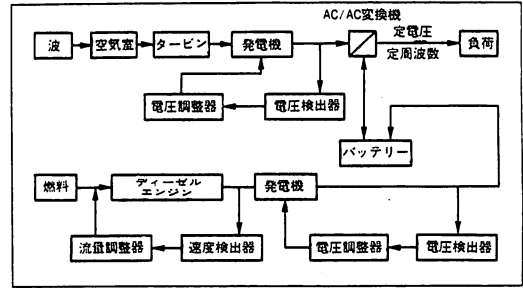


図-8 ハイブリッド形波力発電装置

ると考えられる。但し、波エネルギーという不安定なエネルギーを有効的に使うために、ディーゼル発電装置などとのハイブリッドシステムとしたり、安定な電源とするために、波力発電装置の出力を一担直流としてから、均質な周波数をつくり出す。定電圧定周波数変換装置をもち、バッテリーでバックアップした独立電源とすることが考えられる。図-8に、ディーゼル発電装置とのハイブリッドとした時の機器構成を示す。

(2) 灯台用電力

長距離にわたる送電線施設工場の必要がないので、商用電力を使った場合と遜色のない供給設備をつくることができる。

(3) 電着用電力

海水中に、鋼構造物を設置し、微弱な直流電流を通電すると、陰極側の表面に海水中に高い濃度で溶存しているカルシウムやマグネシウムなどが析出し、この結果できた魚礁が海藻などの良い環境となる。この電着には、変動ある電力でも良いので、波力発電の負荷として、これから大いに期待されているものである。

4.2 熱利用タイプ

(1) 道路融雪

冬期の日本海側のように、降雪の季節と沿岸の波エネルギーが高まる季節が概ね一致することと、抵抗発熱を利用する負荷であったり、タービンの回転を直接熱に変換したり、ポンプで地下水をくみ上げたりして、エネルギーを直接使うことができる利点がある。

(2) 栽培漁業への温水供給

空気タービンの回転力から、直接熱変換するシステムとすれば、波エネルギーに変動があっても、貯湯タンクにより貯蔵ができる。また栽培漁業は海岸に近いので、利用度も高い。

(3) 給湯、暖房システム

(2)と同様に、貯蔵できるため、海岸における地域給湯、レジャー施設に有用である。

4.3 動力利用タイプ

(1) 空気防波堤

港の船留りや競艇場などを静穏な海面にするために海底に敷設したパイプのノズルから気泡を噴出させて消波させるもので、簡易防波堤として利用する。また、港内海水を浄化するエアレーション効果が期待できる。

タービンの回転力で直接コンプレッサーを回転しても可能であるし、発電機で電力変換してから利用することも可能で、比較的シンプルなシステムである。

(2) 海水交換

閉鎖水域である港湾内の水質浄化のために、外洋の海水を揚水し、港湾内へ導水し、港湾内海水を排水することによって行われる。比較的シンプルなシステムで、ランニングコストを必要としない利点がある。

(3) 海水の淡水化

淡水の消費増加に対応するために、波力エネルギーを利用し、逆浸透圧法設備を稼働して、海水から淡水をつくり出すもので、省エネルギー運転となる。

5. 沿岸波力発電システムの将来展望

我が国は、四方を海で囲まれており、波エネルギーを利用する環境として恵まれている。しかし、波エネルギーを利用できるエネルギーに変換することは、耐波浪性を考慮した各機器の設計、発電効率を高める工夫、安定稼働を考慮した運転方式の確立などの技術的課題や、他エネルギーと比較した発電コスト、近隣の環境の著しい変更などの一般的課題があるとされてきた。

それにもかかわらず、波力発電システムに関する研究は、国の機関、大学および民間会社で積極的に行われてきた。これは、現在エネルギー供給の主力となっている化石燃料が有限な量であることから、いずれ将来、エネルギー需要として、波力発電のみならず他の石油代替エネルギーを必要とする時が必ず来ることを意味している。

従って、我々は、その時までには、次のことを成し遂げておかなければならない。

(1) 波力発電システムの仕様決定法の確立

波力発電システムを計画する上で問題となるのは、設置海域の定格波高をいかに決定するか、ということである。設置海域の定格波高を高めに見積もって全体の設備を計画すると、発電効率が低くなるばかりでなく、建設価格が増大する。しかし、定格波高を低く見積もることは大きな出力がとれなくなり、エネルギー

を捨てることになり、負荷に制限を与えることとなる。

(2) 材料選定

沿岸における波の力および塩害のための材料選定は、装置寿命を決める決定的要因であり、建設コストに対しても影響を与える。現在までの実海域実験の結果では何ら問題になることは発生していないが、建設コスト低減の時の材料変更に際しては考慮すべきである。

(3) 発電コストの低減化

波力発電システムの発電コストは、大部分が建設コストである。

空気室は、防波堤や護岸堤を兼ねたものを建設することによって、一つの機能当たりのコストを低減できる。従って、発電装置の構成要素である空気タービンや発電機などの製造コスト、現地建設コストを低減することが今後の課題である。現状においては、波力発電システム用という特殊環境性や材料などのために、その費用は大きくなりがちであるが、将来の確立された機器、多量製造、材料の変更、ユニット化などによって、50円/kWhの実現は可能である。

(4) その他の課題

沿岸を利用して、波力発電システムを建設することで、景観を変更することはわずかである。また、発電設備の観点から、保守要員、主任技術者の育成、補助金制度、法規的、行政的な問題もかかえており、今後の解決を待っている。

参 考 文 献

- 1) 平本昂, 玉木一三, 益田善雄; 沿岸固定式波力発電システムの開発, 第1回波浪エネルギー利用シンポジウム, 昭和59年11月.
- 2) 石井進一(ほか5名); 波力発電用空気タービン発電装置の発電運転試験報告, 海洋科学技術センター試験研究報告, JAMSTECTR 14 ('85)
- 3) 堀田平(ほか5名); 沿岸固定式波力発電装置の開発, 土木学会第10回海洋開発シンポジウム, June, '85.
- 4) 平本昂(ほか2名); 波力発電用空気タービン発電機の技術動向, 富士時報, vol. 58, 12, '85.
- 5) 味岡浩二, 深尾典男; 波力発電に適したウエルズタービン, 日経メカニカル, No.145, p.80~86('83)
- 6) 海洋科学技術センター; 「海明」の第二期計画について
- 7) 波力エネルギーの利用に関する総合調査ワーキンググループ資料; 波力エネルギーの利用に関する総合調査, 昭和61年7月.