

温排水の拡がりに及ぼす地球自転効果の数値的研究 (III)

松 野 健*・永 田 豊**

1. ま え が き

大規模な発電所から放出される大量の温排水の沖合への拡がりは、既に内部変形半径のスケールを越えており、その振舞いを理解するうえで地球自転の影響を考慮する必要があると思われる。著者ら¹⁾は既に数値実験を通して、地球自転の影響下における温排水の拡がりの基本的な性質を示すとともに、福島第一原子力発電所の規模において自転の効果がすでに有意に働いている可能性を指摘した。さらにコリオリのパラメータ、放出水の密度、放出流量、放出流速を変化させたとき、温排水の拡がり方の特性がどのように変化するかを調べた²⁾。これらの数値実験からは、それぞれのパラメータによる依存性の特徴が明らかにされたが、それと同様に、ここで取り扱っているパラメータの範囲内では鉛直方向の渦動粘性および拡散が重要な働きをしていることがわかった。また、実際の温排水が放出されている沿岸域では、粘性や拡散が重要な役割を果たしていると考えられる。このようなことから温排水の拡がりに対する諸パラメータの依存性を考えるとき、粘性、拡散のパラメータについては十分な検討を加えておく必要がある。

今回は、前回までの報告と同様に、福島第一原子力発電所にほぼ対応する放水条件のもとで、鉛直渦動拡散係数を変化させたとき、温排水の拡がり方の特性がどのように変化するかを調べた。このとき、水平方向の粘性および拡散係数については、計算の安定性に関係するため一定の値を用いた。これらの係数の値は、前回の報告で論じたコリオリのパラメータや放出水の密度などと異なり、実際の海域で現実にとどのような値になっているか多分に不明確なものである。ここでは、沿岸域の数値シミュレーションでしばしば使われている値と同程度のオーダーのものを用い、鉛直渦動粘性・拡散係数についてはその前後で変化させた。現実これらがどの程度の値であるかということが不明であるかぎり、それらのパラメータの依存性が大きいほど現実への適用は困難であるという面もあるが、しかし一方では逆にこれらのパラメー

タによる依存性がある程度把握されておれば、現実に観測された温排水等の振舞いから、これらの係数値を推定できる可能性も考えられる。これは将来の問題ではあるが、ここで報告する結果は、海岸工学のスケールの現象に対して、地球自転効果と粘性および拡散係数との関わりを論じる手がかりになるものと考えている。

2. モ デ ル

用いた数値モデルでは、前回と同様南北に走る海岸線を考え、温排水はこの海岸線に設けられた放水路から、東方に向けて水深、密度とも一様な海に放出されるものとする。計算の便宜上、放水路の北 4 km、南 8 km のところに東西に走る岸を設け、沖合 4 km のところに開放境界をおいた矩形の海を考える。ここで方位に物理的な意味はないが、表現の便宜上選んだ。

計算に用いた基礎方程式には静水圧近似、ブジネスク近似を適用し、計算の効率化のため、表面非発散 (rigid lid) の仮定をおいた。また海水の塩分は一様と考え、密度は水温にのみ線形的に依存するとして、計算では直接密度に対する拡散方程式を用いた。これらの方程式系および境界条件は前報告と同様であるので詳細は省略する。

各パラメータの値としては、

$$\begin{aligned} f &= 0.88 \times 10^{-4} \text{ 1/sec}, & 4\rho_0 &= 1 \text{ kg/m}^3 \\ Q_0 &= 80 \text{ m}^3/\text{sec}, & v_0 &= 0.3 \text{ m/sec} \\ A_h &= 10 \text{ m}^2/\text{sec}, & K_h &= 1 \text{ m}^2/\text{sec} \end{aligned}$$

に固定し、 A_v または K_v についての 1×10^{-5} , 1×10^{-4} , $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ の 3 通りに変化させて、その計算結果を比較した。ここで、 f はコリオリのパラメータでは福島島の緯度に対応する値であり、 $4\rho_0$ は放出水と周辺水との密度差で、33‰, 20°C 前後の海水の場合約 4°C の差に相当する。また Q_0 は放出水量、 v_0 は放出水の流速、 A_h , K_h は水平方向の渦動粘性および拡散係数、 A_v , K_v は鉛直方向の渦動粘性および拡散係数である。

数値計算に際しては、モデル海域を水平方向には 200 m × 200 m の格子に区切り、また鉛直方向には上層から 2, 2, 2, 3, 5, 8, 8 m の 7 層に分けて、3次元レベルモデルによって時間積分を行った。

* 理博 (財)海洋生物環境研究所 主任研究員

** 理博 東京大学教授 理学部地球物理学科

3. 鉛直渦動粘性係数 A_v の値による温排水の振舞いの相違

鉛直渦動拡散係数 K_v を $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ として、鉛直渦動粘性係数 A_v を 1×10^{-4} と $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ の2通りに変化させた場合、また K_v を $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ として A_v を 1×10^{-5} と $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ の2通りに変化させた場合について計算を行った。前者の2ケースについて、温排水放出後 48 時間における表層での密度分布および水平流速分布を 図-1 に、また後者の2ケースについて同様の分布を 図-2 に示した。図では、放出水と周辺水の密度差 $4\rho_0$ の 0.05 を単位として等密度線を引いた。

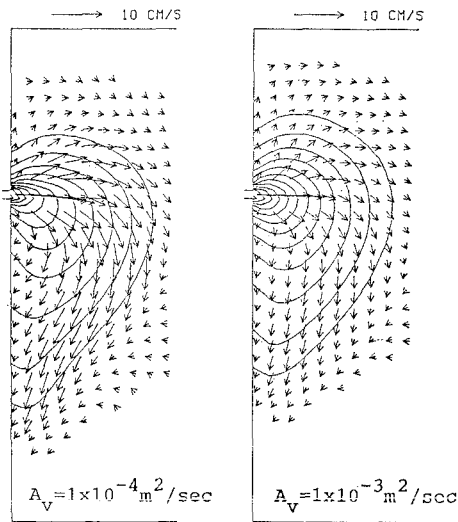


図-1 A_v の変化による表層での密度場、水平流速場の変化 (1), $t=48 \text{ hrs}$, $K_v=1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$

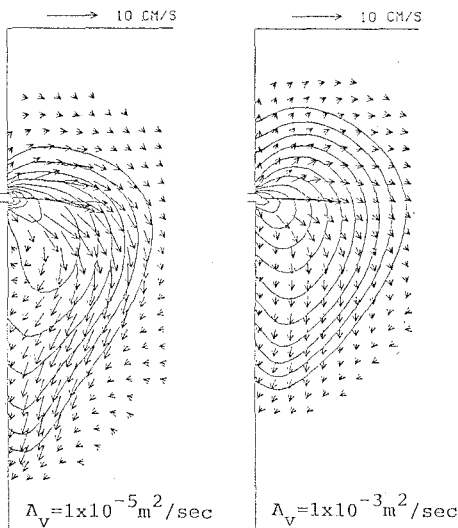
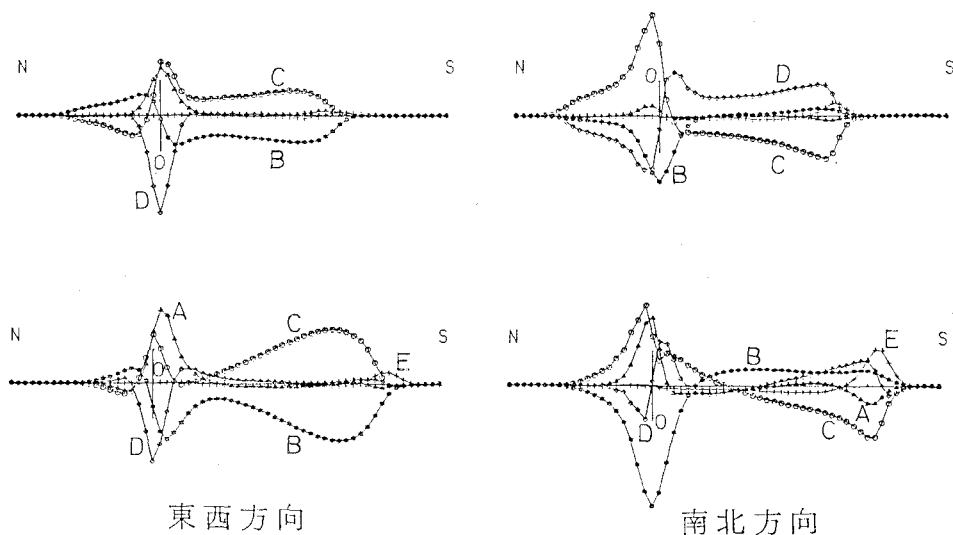


図-2 A_v の変化による表層での密度場、水平流速場の変化 (2), $t=48 \text{ hrs}$, $K_v=1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$

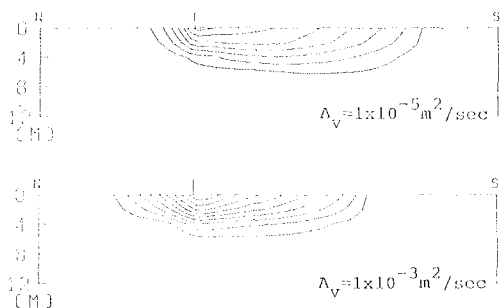
したがって最も外側の等密度線は $4\rho_0$ の 0.05, 次が 0.1 となる。ただし放水口の極く近傍では簡単のため等密度線を一部省略した。以下の密度分布図では同様の要領で等密度線を引いた。これらの図から明かなように、 A_v の値が減少することによって温排水に伴った流れ ($f=0$ の場合には等密度線と流速ベクトルはほぼ直行するが、 $f \neq 0$ の場合には流速ベクトルは等密度線に平行な方向の成分が大きくなる。) がより等密度線に沿った方向となるとともに、その流速も大きくなっている。また、 A_v の減少は温排水の北への拡がりを抑制するとともに、南への拡がりを助長しているのがわかる。その南への拡がりには上述の温排水に伴った流れの特徴を反映して、特に南端部ではより岸に局限された形状で延びている。以上のような A_v による相違は、図-1 と 図-2 の比較から明かなように、 A_v の変化が大きいほど著しい。

$A_v=1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ の場合には、放水口のすぐ南側で放水口に向かう流れが形成されているのが 図-2 からわかるが、これは A_v の値を小さくすることによって現われてきた現象である。このことと、上で述べたように A_v を小さくするほど温水の南端部の延びが岸寄りに限られる形状になることは、放水口の南側に大きな時計廻りの温水塊ができ、その温水塊の南端から岸に沿ってさらに南へ温水が舌状に延びるという回転水槽実験⁹⁾で見られた現象が、 A_v を小さくすることによって数値実験でも現われてくることを示唆している。

A_v を変化させることによって現象を支配する物理機構がどのように変化するかをみるために、図-3 に岸から 700 m の線上の表層における運動方程式の各項の寄与の分布を $A_v=1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ および $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ の場合について示した。特に放水口より南側についてみると、 A_v が大きい場合には東西方向の運動方程式では地衡流のバランスが成り立っており、南北方向の運動方程式では圧力項と摩擦項とが釣り合った密度流的なバランスになっている。一方 A_v が小さくなると、東西方向では同様に地衡流バランスが成り立っているが、南北方向については、 A_v が大きい場合に比べてコリオリ項の寄与も大きくなり複雑なバランスになっている。また、 $A_v=1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ の場合について南北方向の運動方程式をみると、放水口のすぐ南側では温水の南端近くと比べて圧力勾配が逆転しているのがわかる。このことは前に述べた放水口のすぐ南側の放水口に向かう流れは、局所的な現象であるというより、むしろ温水塊の拡がり全体から形成される圧力場に起因していることを示しており、 A_v を小さくすることによって、放水口の南に時計廻りの温水塊が形成される傾向が生じていると言える。すなわち、 A_v の減少が数値実験の結果を回転水槽実験の結果に近づけるといふ傾向が運動方程式のバランスからも窺える。



図—3 距岸 700 m の表層における運動方程式の各項の寄与の分布. A: 移流項, B: コリオリ項, C: 圧力項, D: 粘性項, E: 時間変化項, $t=48$ hrs, 上; $A_v=1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$, 下; $A_v=1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$



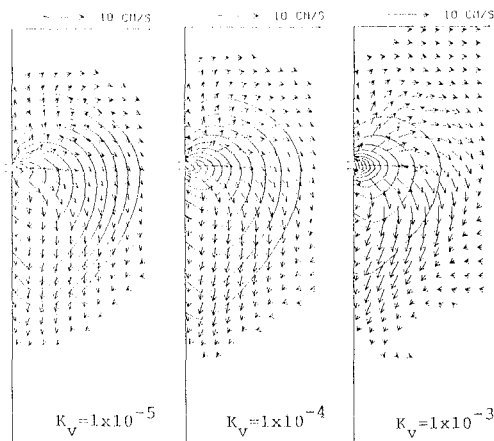
図—4 A_v の変化による密度断面 (距岸 600 m) の変化, $t=48$ hrs

$A_v=1 \times 10^{-5}$ および $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ の場合について、図—4 に岸から 600 m の位置における南北断面内の密度分布を示す。 A_v が小さい場合には、温水層が最も厚くなる位置がより南になっており、 $A_v \rightarrow 0$ の場合に放水口の南で時計廻りの温水塊ができる傾向にあることを反映していると考えられるが、全体としては温水層の厚さに A_v による大きな相違は認められない。

4. 鉛直渦動拡散係数の値による温排水の振舞いの相違

温排水塊の鉛直的な形状は、その拡がりに対する地球自転効果の現れ方と関係が深いことを前報²⁾で述べた。ここでは温水の鉛直的な構造に大きく影響するであろう鉛直渦動拡散係数 K_v の値による依存性を調べる。

鉛直渦動粘性係数 A_v を $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ に固定し、 K_v の値を 1×10^{-5} , 1×10^{-4} , $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ の3段階に変化させて、その結果を比較した。この3つのケースについて、温排水放出後 48 時間における表層での密度



図—5 K_v の変化による表層での密度場、水平流速場の変化, $t=48$ hrs, $A_v=1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$

分布および水平流速分布を図—5 に示す。まず温排水に伴った流れについては、前述の A_v による依存性とは逆に、 K_v が大きい場合の方が流速が大きくなり、またその流向もより等密度線に沿う傾向が認められる。これは、 K_v が大きい場合には鉛直拡散が、大きい流速による移流とバランスし得るため、比較的大きな流速で密度場が定常状態に近づくことによると考えられる。また温排水の水平的な拡がりについては、図—5 では K_v が大きいほど拡がりが小さくなっている。しかしこの温水の水平的な拡がりの K_v による変化については注意を要する。図—5 では一番外側の等密度線を 0.05 としたために、一番外側の等密度線の拡がりは K_v が大きいほど小さくなっている。しかし、 K_v が小さい場合には温水塊の外側、特に南端部で等密度線の間隔が狭くなっている

のに対し、 K_v が大きい場合には外側の方が等密度線の間隔は広がっている。このことは、例えば 0.01 の等密度線についてみれば、 K_v による南への拡がりの相違は小さくなることを示している。すなわち、温水の外縁部の南への拡がりは K_v の値によってあまり変化しないということになり、流速ベクトルの分布からもそれが窺える。

ところが、より高温部すなわち温水塊の内部領域についてみると、図-5 から明らかなように K_v が小さい方がより大きく拡がっており、南への伸びも著しい。このように等密度線の値によって温水の南への伸びの様子は異なる。その相違をみるために、いくつかの等密度線について最南端の位置の時間変化を3つのケースについて図-6 に示した。各等密度線ともその南へ伸びる速さは時間とともに遅くなっているのがわかるが、その南への伸びが時間とともに遅くなる割合は、より高温部に相当する等密度線ほど大きく、またこの傾向は K_v が大きい方が著しい。すなわち、温水の外縁部を除いて、各々の

等密度線の南への拡がりが定常状態に達するのに要する時間は、 K_v が大きくなるにつれて短くなることがわかる。このような K_v による依存性は前報²⁾で述べたコリオリのパラメータ f による依存性と逆の傾向 ($K_v \rightarrow$ 大は $f \rightarrow$ 小に相当) になっている。ところが K_v による依存性は、必ずしも温排水の拡がり特性全般について f による依存性と逆傾向にあるわけではなく、図-7 に示すように、 K_v が大きいほど温水層は厚くなっており、これは f を大きくした場合と同様の傾向にあることがわかる。ただし、 $f \rightarrow$ 大の場合には温水層は高温部まで厚くなっていたのに対し、 $K_v \rightarrow$ 大の場合には、水平的な拡がりがそうであったように、密度差の小さい部分で等密度線の間隔が広く、外側の等密度線が特に深くまで及んでいるという鉛直構造の相違はある。いずれにせよ、このように K_v による依存性は f による依存性と同一傾向を示す面と逆の傾向を示す面とがあり、また同一傾向を示す温水層の厚さについてもその内部構造の相違は明瞭である。同様のことは他のパラメータによる依存性と比較した場合についても言えることであり、 K_v には K_v 独特の依存性があると言えな。また K_v による依存性に限った場合でも、前述のように K_v が小さい場合には温水の外縁部、特に南端部がフロント状になるのに対し、 K_v が大きい場合には、外側の方が等密度線の間隔が広いといったような形状の相違があって、定量的な議論は難しい。

5. A_v および K_v による依存性について

温排水の拡がりに伴った流れに関しては、 A_v が小さいほど、また K_v が大きいほど、より地衡流に近づくとともにその流速も大きくなることがわかった。この A_v と K_v とが逆の方向に寄与することより、現象は A_v と K_v の比、すなわちプラントル数 $\sigma = K_v/A_v$ に依

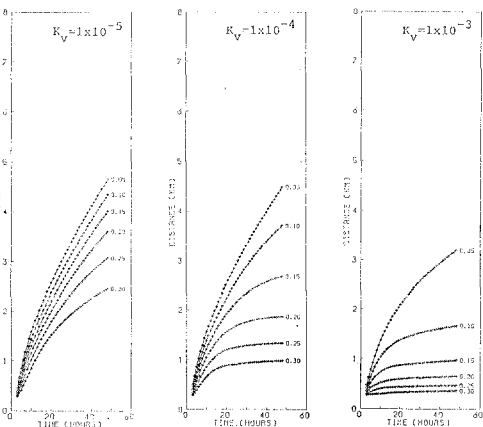


図-6 いくつかの等密度線の最南端の位置の時間変化

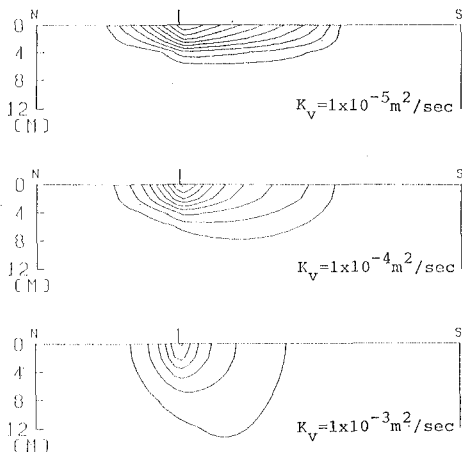


図-7 K_v の変化による密度断面 (距岸 600 m) の変化, $t = 48$ hrs

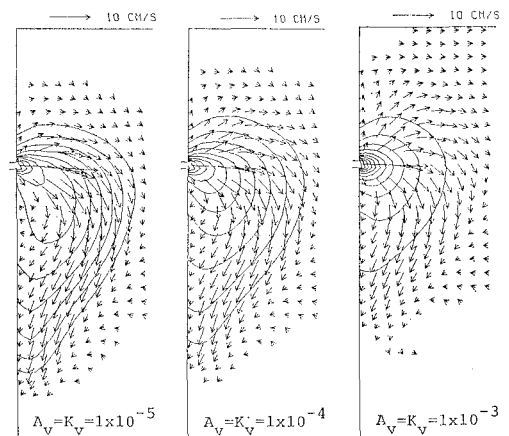


図-8 A_v , K_v ($A_v = K_v$) の変化による表層での密度場, 水平流速場の変化, $t = 48$ hrs

存している面があるのではないかと考えられる。 σ を一定(=1)として A_0 , K_0 を 1×10^{-3} , 1×10^{-4} , 1×10^{-5} m^2/sec と変化させた場合の計算開始後48時間における表層の密度分布および水平流速分布を図-8に示す。温排水の拡がりに伴った流速に関する逆の依存性から推察されたように、確かに温水に伴った流れの大きさについては、プラントル数を一定とした場合、 A_0 と K_0 の値が変化してもあまり大きな相違は現れない。ところが一方温排水の拡がりに関しては、図から明らかなように例えば、 A_0 , K_0 が小さいほど南端部のフロント形状は顕著であり、また高温部の放水口を中心とした非対称性も著しいなど、 A_0 と K_0 の値によって大きな相違がある。このように温水の拡がりに伴った流れの大きさについては、プラントル数がそれを決定する因子として働いていることも考えられるが、温排水の拡がりに対しては、それを整理するパラメータとしてプラントル数はあまり有効でないことがわかる。

6. おわりに

いままで述べてきたことより、 A_0 や K_0 の値によって地球自転効果の現れ方がどのように違ってくるか、それをある1つの基準で評価することはできないことがわかる。これは温排水の拡がりに対する地球自転効果というものを1つの尺度で測ることができないことを示すとともに、その効果の度合を支配する簡単な無次元数を見出すことが困難であることを示唆している。

そこでここでは温排水の拡がりに対する地球自転効果を現すいくつかの特徴が、 A_0 や K_0 などのパラメータの値によってどのように変化するかをまとめ、表-1に示した。表では A_0 , K_0 のほかにも前報²⁾でとり上げ、比較的明瞭な依存性がみられたパラメータ f と $\Delta\rho_0$ についてもその変化のしかたを示した。今まで述べてきたように地球自転効果の現れ方は多様であることがこの表からもわかる。例えば温水の南端の延びに対して A_0 と f

表-1 各パラメータによる温水の振舞いの相違

パラメータ	温水に伴った流速	南端部の延び	高温部の南への拡がり	定常に達する時間スケール	温水層の厚さ
A_0	—	—	?	—	0
K_0	++	?	—	—	++
f	—	—	++	++	++
$\Delta\rho_0$	++	++	—	—	—

注) ++ パラメータの増大に伴って明らかに増大する。
 — パラメータの増大に伴って明らかに減少する。
 — パラメータの増大に伴って多少減少する。
 0 パラメータの変化に対してほとんど変化しない。
 ? 判断が難しい。

とは同じ「—」の依存性をもっているが、温水層の厚さについては共通性がないなど、その拡がりの形状に関しては異なった寄与のしかたをしている。また、同じ記号であらわされた場合でも南端部の等密度線の間隔が全く異なった傾向を持っているなど、この表で示された傾向のみでは、温水の拡がりの形状の詳細は表現されていない。なお、ここでは考慮に入れなかったが、表面からの冷却の効果等については、今後とも研究を続ける予定であるが、以上の点から考えて、今後実際の温排水の拡がりについて予測を考える場合、ここに示された各種のパラメータ、特に鉛直渦動粘性係数 A_0 、鉛直渦動拡散係数 K_0 の選び方がその成否を決める大きなポイントとなるであろう。実測的な研究からこれらの量を決めていくことが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 松野 健・永田 豊: 温排水の拡がりに及ぼす地球自転効果の数値的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 536~540, 1983.
- 2) 松野 健・永田 豊: 温排水の拡がりに及ぼす地球自転効果の数値的研究(II), 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 732~736, 1985.
- 3) 永田 豊・北村佳照・道田 豊・福森一郎: 回転水槽による温排水の拡がり方に対する地球自転効果の研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 531~535, 1983.