

夏季の内湾性砂浜海岸周辺の水温・DO・クロロフィルaの変動特性について

灘岡和夫*・内山雄介**・瀬崎智之***

1. はじめに

近年、全国各地の海岸に高いアメニティ性を視野に入れた人工ビーチが多数造成されており、これは東京湾のような内湾性水域においても例外ではない。しかしながら、それらの多くは、赤潮・青潮・アオサの異常発生等の様々な水質問題を抱える水域に存在するため、砂浜海岸として求められる機能を十分果たしているとは言い難い。そのため、特に内湾性水域における海岸空間の設計には、従来の漂砂や景観面に重点を置いた考察に加え、周辺の水環境などを含めたより幅広い視点からの設計が必要となる(灘岡, 1994)。しかし、既存の内湾性水域に関する研究では、湾の内部などでの流動・水質に重点がおかれ、陸との境界部としての極浅水域に関しては、干潟の水環境に興味が集中しており、砂浜海岸に関する研究がほとんど行われていなかったのが現状である。そこで本研究では砂浜海岸の水環境システムを評価するための基礎的研究として、海水の流動特性や水質・生態系が著しく変動する夏季の状況下での砂浜海岸周辺水域における現地観測と、海水面での熱収支を考慮した鉛直一次元の数値計算により、このような内湾性砂浜海岸周辺の極浅水域における水環境とそれを構成する物理プロセスを明らかにすることを試みた。

2. 現地観測

2.1 観測の概要

現地観測は、東京湾最奥部に位置する千葉市美浜区稲毛海浜公園内(図-1)の人工ビーチにおいて、1995年8月7日から9月7日まで実施した。人工ビーチは浜幅約50mで、磁北より約40度西に向いた方向に全長1200mにわたって延びており、両端を全長約200mの突堤で挟まれている。養浜のための潜堤はなく、海底の勾配は約1/50で沖側と連続的に接続しており、突堤の先端部(汀

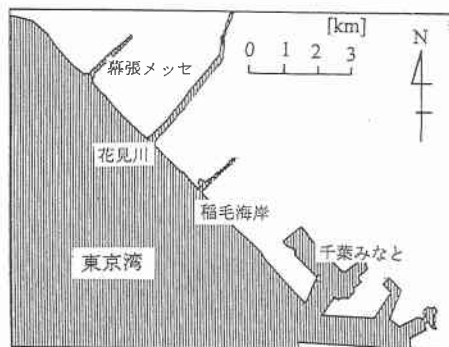


図-1 観測地点周辺の地図

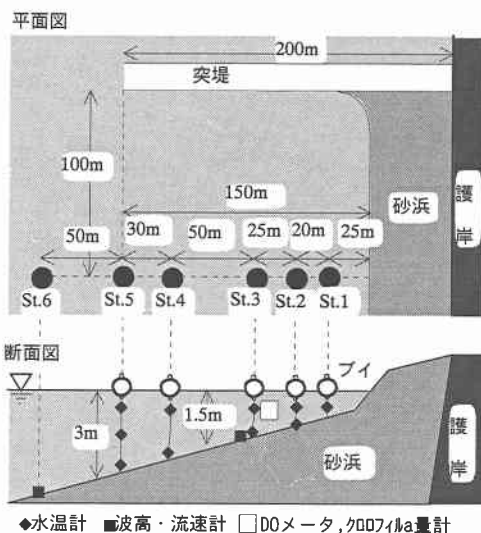


図-2 観測機器配置図

線から約150m沖)での平均水深は約3.5mである。周辺の主要な河川として花見川の河口が北西方向約2kmに位置にある。図-2のように、突堤から100m離れた岸沖断面内の5点にブイを設置し、メモリー式水温計(MDS-T, アレック電子)を4点に、DOメーター(MDO-1, 三洋測器), クロロフィルa量計(ACL11-8M, アレック電子)を1点(St. 3)に係留した。また、St. 3および最も沖側の測点であるSt. 6の2地点の海底に波高・流速

* 正会員 工 博 東京工業大学大学院教授 情報理工学研究所情報環境学専攻

** 学生会員 修(工) 東京工業大学大学院 情報理工学研究所情報環境学専攻博士課程・日本学術振興会特別研究員

*** 学生会員 東京工業大学大学院 情報理工学研究所情報環境学専攻修士課程

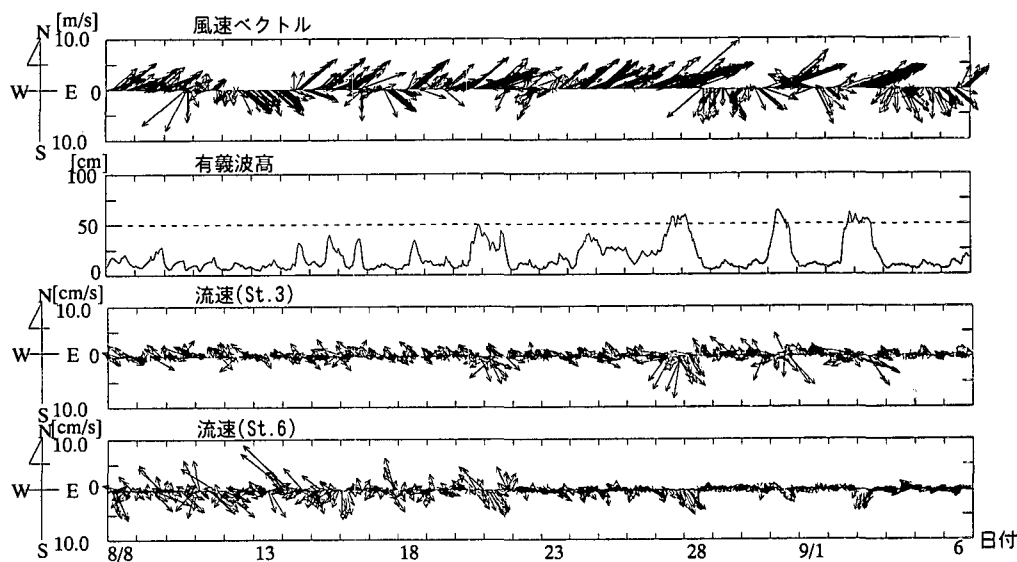


図-3 風速ベクトルおよび有義波高、流速ベクトルの時系列

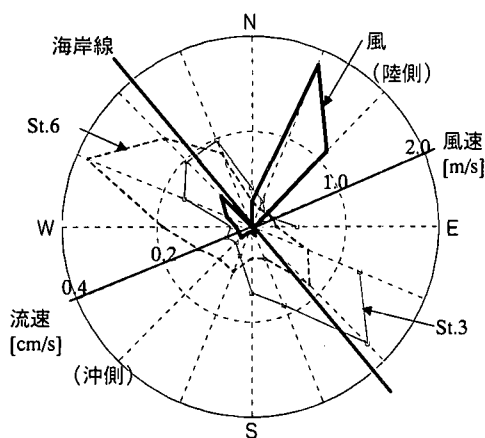


図-4 一日平均の風向と海水の流向

計 (WAVEHUNTER, アイオーテック) を設置し、連続観測を行った。水温計は水深に応じて、ブイ 1 個につき鉛直方向に 1~3 点配置した。その際、水表面から 2 点は水深 30, 150 cm の位置にそれぞれ係留し、最も海底側の 1 点は海底より 30 cm の位置に固定されるように、先端に小型フローティングブイをつけたロープに設置した。DO メーター・クロロフィル a 量計は、水表面から 50 cm の位置に係留した。観測期間中、観測地点に近い千葉測候所までまとまった降雨が記録されたのは、8 月 10, 11, 22 日の夕方のみであり、晴天が続き、連続熱帯夜が新記録を更新するなど、記録的な猛暑であった。

2.2 海水流動特性

図-3 に海底から約 60 cm の高さの 1 時間平均流速、

有義波高、および千葉港港湾事務所観測塔で測定された風向・風速を示す。観測期間中前半は、風が弱く、有義波高も 50 cm 以下と小さく、後半は前半と比較して風が強い時期があり、有義波高も最大で 50 cm を超えている。しかしながら、平均流速 5.0 cm/s を超える流速はほとんど記録されておらず、観測地点は、波高が小さく、流動が非常に抑えられた水域であったと言える。

図-2 の風速・流速ベクトルを各ベクトル成分毎に、期間中の合計を求め、それを日数で除して 1 日平均の風向・流向を求めた (図-4、但し、値はベクトルの方向を示す)。これを見ると、風は主に海岸線にほぼ垂直に海側から吹いており、いわゆる海風が支配的である。それに対し海水流速は、突堤に挟まれた領域中 (St. 3) と沖側 (St. 6) とともに沿岸方向流速成分が卓越しており、しかも両者は平均的には互いに逆方向を示す傾向にある。

2.3 水温変動特性

気温・風速と、St. 3, St. 5 の各水深での水温の時系列を図-5 に示す。これを見ると、水温は気温と同様に明確な日周変動パターンを示していることが分かる。一日周期で変動する外因は日射のみであることから、本観測を実施した内湾性極浅海域の水温変動に対して、日射が本質的に重要な役割を果たしていることが分かる。

次に水温の鉛直構造に着目すると、St. 3 では、観測期間中のほとんどの期間で表層と底層の水温が一致しているが、St. 5 では多くの期間で各層間に水温差が生じている。これは、St. 5 において、温度成層が形成・崩壊を頻繁に繰り返していることを示すものである。さらに St. 5 の水温と風速との関係に着目すると、成層の形成は風速

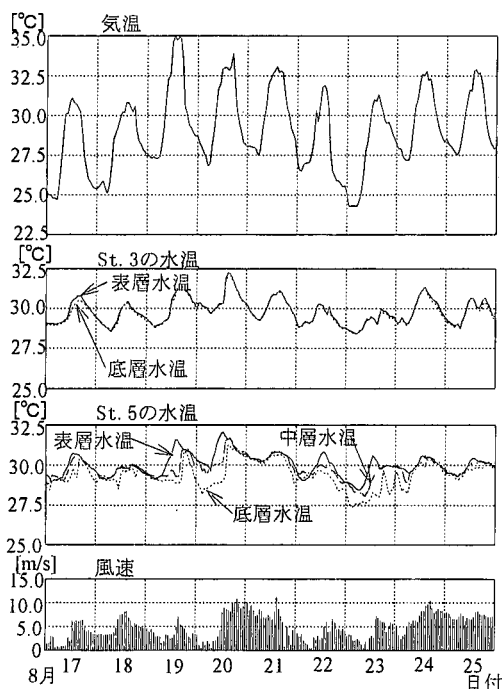


図-5 気温および St. 3, 5 の各水深での水温・風速変動

が非常に小さい時に限られており、8月21日～24日にみられるように風速5 m/sに満たない時期が続くと、次第に成層が発達して各層の水温差が大きくなる。しかし、風速が7 m/sを超える期間(8月20, 24日)では成層が一気に崩壊し、表層水温の変動振幅も減少している。これは、観測期間中にしばしば見られたパターンである。

また、図-6の期間では、潮位の上昇に対応して、St. 5の底層水温が著しく低下している様子が示されている。これは、この時期が大潮(11日)を挟んでおり、他の期間と比較して潮位振幅が大きく、数日間の微風状態で発達した沖の温度躍層下の海水が、潮汐によって満潮ごとに観測地点の底層部に貫入しているものと考えられる。この水域では一般に、数日間発達した躍層下の海水は貧酸素性であるものの栄養塩濃度が高い水塊であることが知られている。このため、本観測により見出された底層水の貫入によって、もともと溶存酸素量が大きく生物生産が活発な極浅海域に、沖から栄養塩が供給されるメカニズムが存在するものと推察される。

次に、岸沖断面内の4点での表層水温の時系列図を示す(図-7)。これを見ると、岸沖方向の水溫構造は、日周変動の振幅が汀線側の水溫ほど大きく、昼間汀線側のほうがより高温であるのに対し、夜間には逆転して沖側の水溫がより高い値を示す傾向にある。これは、2.2で示したように、この水域では水平流動がかなり弱いため、水平方向の海水の混合が表層においても非常に抑えられ

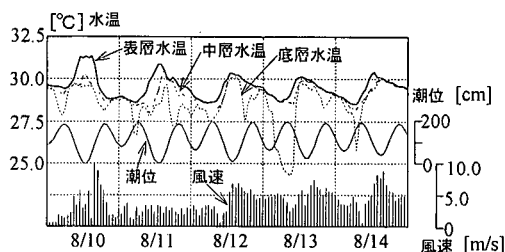


図-6 St. 5 の各水深での水温と潮位・風速

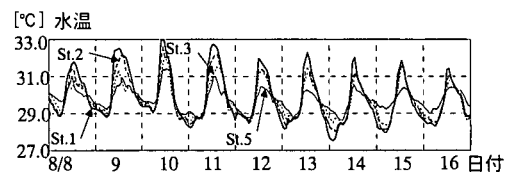


図-7 岸沖断面内4点での表層水温

ていることを示している。

以上のことから、本観測で取り上げた内湾性の非常に浅い水域での水溫構造は、潮汐モードでの密度構造の変化が卓越する大潮期を除いて、ほぼ鉛直一次的な熱収支バランスによって決定されているものと考えられる。

2.4 DOとクロロフィルa量の変動特性

図-8に St. 3 (水面下50 cm)でのDO、クロロフィルa、および日照時間・風速の時系列を示す。前述した水溫と同様に、DO・クロロフィルa量ともに昼間高く、夜間低い日周変動パターンを示している。DO値は、飽和度で表現すると、例えば8月8, 9, 10日では日最低値として50%以下、最高値で200%以上であり、きわめて激しい日内変動を記録している。また、昼間のピーク値が高い日ほど夜間に著しく減少する傾向にあり、植物プランクトンが昼間光合成を、夜間酸素消費を活発に行っていることを示している。それに対し、8月15と16日、8月21日等では、日照時間は平均以上ありながら、DO値の日周変動幅が小さい。この期間は風速が比較的大きい期間であることから、光合成活動等によって酸素が十分に供給された表層付近の海水が、風応力に伴う鉛直混合によって底層部の海水と混合しているものと考えられる。

一方、クロロフィルa量も同様に非常に大きな振幅で日周変動しており、そのピーク値は20 $\mu\text{g/l}$ に達している。クロロフィルa量に関しては、植物プランクトン種や海域の相違にもよるが、10 $\mu\text{g/l}$ 程度で赤潮が発生する例も報告されており(花岡, 1972)、一方、外洋性水域である茨城県鹿島灘沿岸域において本観測とほぼ同時期に行われた観測では、1～2 $\mu\text{g/l}$ で推移すると報告されている(八木ら, 1996)。以上のことから、この水域で

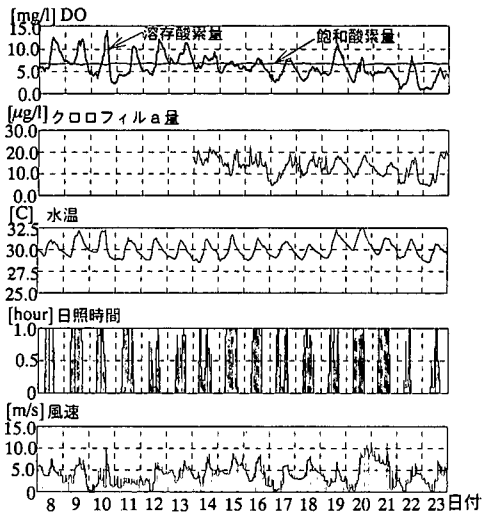


図-8 DO およびクロロフィル a 量の時間変動

のクロロフィル a 量はきわめて大きく、その日内変動もかなり激しいものであったといえる。クロロフィル a 量の日周変動は、植物プランクトンの個体数が、繁殖・死滅・捕食などの生物活動により、生息密度を日周期で変化させていることによるものと考えられるが、プランクトン（鞭毛藻類）の日周期での鉛直方向移動で説明されることもある（例えば、宗影ら, 1994）。しかし、本研究では、プランクトン種やクロロフィル a 量の鉛直分布等に関する情報がないため、この日周変動パターンを引き起こす原因を特定することはできない。

3. 数値計算

3.1 数値計算の概要

以上の観測結果より、夏季の内湾性極浅海域での水温構造は、大潮期を除いて、ほぼ鉛直一次元的な熱収支バランスによって決定されていることが判明した。そこで、鉛直一次元数値モデルを用いて、このような水域特有の水温変動パターンがどの程度再現できるかを確認し、さらに変動パターンに寄与する要素について検討するべく、数値計算を行った。この時、未知パラメータを極力排除することを念頭に、入力条件として気象データのみを用いるようにモデルを構築した。

3.2 一次元数値モデル

数値モデルでは、大気・海水・土壌中での流体・熱等の移動を解き、水表面・海底面での熱収支を計算することによって三者を結合した。基礎方程式は運動方程式、熱・水蒸気・塩分濃度拡散方程式である。鉛直渦動粘性係数と熱の鉛直乱流拡散係数は、Mellor and Yamada (1974) の乱流 closure model level. 2 を用いて評価し、簡単のため、水蒸気・塩分濃度の乱流拡散係数は熱のそ

れと同じ値を用いた。大気域での運動方程式と熱拡散方程式はそれぞれ式 (1), (2) のようになる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{ma} \frac{\partial U}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{ha} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 z : 鉛直座標（上向きを正）、 U : 風速、 T : 気温、 K_{ma} : 大気中での渦動粘性係数、 K_{ha} : 大気中での乱流拡散係数、である。水蒸気、海中の塩分濃度の式は式 (2)、海水の運動方程式は式 (1) と同様の式形であるため省略する。また、式 (3) が海中での熱拡散方程式である。

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{hs} \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + \frac{1}{C_p \rho} \frac{\partial Q(z)}{\partial z} \dots \dots \dots (3)$$

但し、 T_s : 水温、 K_{hs} : 海水中での熱の乱流拡散係数である。海底土壌の熱伝導式は以下のようなになる。

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\lambda_c}{C_c \rho_c} \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} \dots \dots \dots (4)$$

T_c : 土壌の温度、 ρ_w : 海水の平均密度、 λ_c : 土壌の熱伝導率、 C_c : 土壌の比熱、 ρ_c : 土壌の密度である。海水表面の熱収支式・海水中での透過日射量は、平山・和氣 (1995) と同様のモデルを用いた。

$$(1-\alpha)\beta H_{ss} + H_{an} - H_{br} = H_c + H_e + H_w \dots \dots \dots (5)$$

$$Q(z) = (1-\alpha)(1-\beta) H_{ss} \exp(\gamma z) \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 H_{ss} : 水面での日射量、 H_{an} : 大気放射量、 H_{br} : 水面放射量、 H_c : 顕熱フラックス、 H_e : 潜熱フラックス、 H_w : 水面から水中への熱輸送量、 α : 水面の albedo (≒ 0.06)、 β : 水表面での日射吸収率、 γ : 消散係数(水中での短波放射の減衰率)である。水表面での顕熱・潜熱フラックスは Monin-Obukhov 則により求めた。また、海底面の熱収支式には、海底面に到達した日射量と海底土壌への伝導熱・海底面での海水中への熱フラックスを考慮した以下の式 (7) を与えた。

$$H_{wb} = H_{sb} - G \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 H_{wb} : 海底面から水中への顕熱輸送量、 H_{sb} : 海底面での正味日射量、 G : 土壌への伝導熱である。

3.3 計算結果

計算条件は表-1 に示す通りであり、4 ケースの計算を行った。図-9 に、各計算条件下での、表層(海水面より 30 cm)、中層(海水面より 150 cm)、底層(海底より 30 cm) の各水温の時間変化を示す。まず、St. 5 を想定して、微風速、高濁度(消散係数大)、水深 3.5 m で行った結果では、明確な温度成層が形成されている(図-9 (a))。同時に、底層水温ほど変動の位相が遅れるという観測時に見られた傾向が良好に再現できている。

しかし、(a) の条件から上空風速のみを変化させ、表 7.5 [m/s] に設定した計算を行うと、各層間の水温差を

表-1 計算条件 (上: 共通, 下: 各 run 毎)

短波放射	$H_{ss} = -900 \cos(2\pi t/24)$ [W/m^2] ($H_{ss} > 0$)
長波放射	$H_c = 400$ [W/m^2]
計算格子数	大気 (30 mesh) + 海水 (20 or 35) + 海底土壌 (10)
時間刻み	$\Delta t = 3.0$ [s]

	水深 [m]	U_{10} [m/s]	γ	海水中格子数
run-1	3.5	2.5	1.6	35
run-2	3.5	7.5	1.6	35
run-3	2.0	2.5	1.6	20
run-4	3.5	2.5	0.1	35

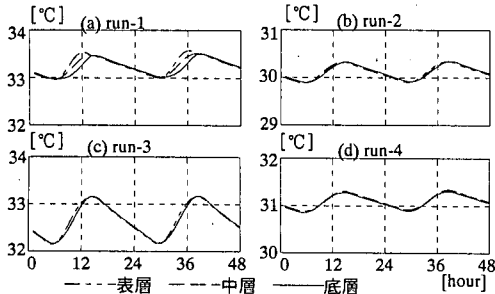


図-9 計算結果: 水温の鉛直分布の時間変化

ほとんど生じない混合された水温構造を示す結果になった(図-9(b)). また, 観測期間中鉛直方向に水温差がほとんど生じなかった St. 3 を想定し, (a) より水深を浅い条件に変えた計算(図-9(c))では, 日周変動の振幅が(a)と比較して大きくなるものの, 上空風速が非常に小さい状況下(2.5 m/s)でも, 各層間に水温差を生じないという観測と同様の傾向が見られる。

次に, 外洋性水域を想定して濁度が低い条件($\gamma=0.1$)で行った計算結果を見ると(図-9(d)), 水温の鉛直分布がかなり一様化している。また, 1日の平均水温も, (a)に比べ, 2°C 近く低い値で推移する結果を示しており, 消散係数(日射の減衰率)が内湾性水域の水温構造を大きく特徴づけていることが分かる。ところで, この消散係数 γ の決定に関わる重要なパラメータとして, 植物プランクトン濃度が考えられるが, 本研究の現地観測により,

その値は日周期で大きく変動することが確認されている。このことは, ここで用いた物理モデルに, プラントンなどの生物モデルを組み込むことが今後の重要課題であることを示している。

4. 結 論

本研究で得られた主要な結論は以下の通りである。

- ①内湾性砂浜海岸周辺の水温・溶存酸素量・クロロフィルa量は明確な日周変動をしており, これらは日射に強く支配されている。
- ②極めて浅い水域であるにも関わらず, かなり明瞭な成層構造が頻繁に形成・崩壊を繰り返している。
- ③成層が発達した時期には, 潮汐に対応した底層への冷水塊の貫入が存在する。
- ④数値計算により, 日射の減衰率が, 成層構造や水温の時空間変動特性を大きく特徴づけることなどが分かった。

謝辞: 現地観測では, 千葉市西部緑地公園事務所, 千葉港港湾事務所のの方々および東工大土木工学科水工研の諸氏に多大なるご助力いただいた。また, 本研究は文部省科学研究費補助金試験研究(B)(1)(課題番号: 07555642, 代表者: 灘岡和夫)および同特別研究員奨励費(内山雄介)の一部を使用した。併せて多大なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 灘岡和夫(1994): 海岸空間デザイン論の新展開, 港湾, Vol. 71, pp. 48-57.
- 花岡 資(1972): 赤潮, 生態学講座 32, 生物の異常発生, pp. 94-124, 共立出版.
- 平山彰彦・和氣亜紀夫(1995): 浅水域における成層の発達・消滅過程の数値再現, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1061-1065.
- 宗影志浩, 中川倫寿, 福田 稔(1994): 鞭毛藻プランクトンの鉛直移動と亜表層部の貧酸素化機構について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1116-1120.
- 八木 宏, 緒方健太郎, 足立久美子, 灘岡和夫(1996): 夏季の鹿島灘波崎海岸における水温とクロロフィルの日変動, 第51回年次学術講演会概要集(印刷中).
- Mellor, G. L. and Yamada, T. A (1974): Hierarchy of turbulence closure model for planetary boundary layer, *J. of the Atmospheric Sci.*, Vol. 31, pp. 1791-1806, 1974.