

波動場における直立円柱まわり底面近傍の流れに関する実験的研究

小林 智 尚*

1. 緒 言

海洋海岸構造物の周辺域に発生する局所洗掘は、その構造物の安全性に関わる工学上重要な問題であり、従来より数多くの研究が行われている。そして局所洗掘の予測と防止のためには現象そのもののメカニズムの解明が必要不可欠である。

小口径の直立円柱型構造物のまわりに発生する局所洗掘現象を例によると、河川中でみられる局所洗掘に対しては、宇民（1976）の研究などによりこの現象を特徴づけている馬蹄形渦などの流れが解明されつつあると同時に、中川・鈴木（1974）により局所洗掘の工学的なモデル化もなされている。

一方、海洋海岸域に目を向けると、対象とする流れ場は、波動場あるいは波・流れ共存場であり、このような場でも西沢・沢本（1989）などにより局所洗掘現象のメカニズムの解明が進められている。彼らは一連の実験的研究の成果を基礎に、その実験条件の範囲内の波動場では馬蹄形渦の存在は認められず、にもかかわらず河川中でみられる馬蹄形渦に特有の逆円錐形をした局所洗掘地形と同様の地形が波動場では馬蹄形渦なしに得られると主張している。これに対し横木ら（1989）は、波動場中の直立円柱周辺域の流れについて、その流れの対称面内の流速分布をレーザー流速計で測定し、波動場では成長過程の弱い馬蹄形渦が存在し、さらに半周期ごとに流れの向きが反転するため円柱からの剝離渦により生ずる流れが主流反転後の馬蹄形渦生成に寄与しているという結果を得ている。このように、波動場においても局所洗掘に関する研究が数多く行われつつあるが、それにも関わらずこの現象を支配する流れの詳細はほとんど解明されていないのが現状であり、またその一方、これらの研究の大部分は、海洋海岸域での局所洗掘現象を支配する要因が無数にあるためか、与えられた流れ場の外的条件とその結果としてきた局所洗掘地形との直接的関係を扱っており、局所洗掘現象のメカニズムそのものについて議論している研究が少ないのも現状である。

この複雑な局所洗掘現象を統一的に解明・予測するには、従来ブラック・ボックス的に扱われがちであったこの現象のメカニズムを解明する必要がある。そこで、本研究では、波動場における比較的小口径の直立円柱を対象とし、そのまわりに生ずる局所洗掘現象のメカニズム解明の第一歩として、円柱周辺部の3次元流体運動を実験的に捉え、その特徴の解明を試みる。

2. 実験方法

実験で用いた水路は、底面が滑面で、また多重反射の発生を抑えるために円柱に較べて十分大きくかつ反射波吸収式造波装置を備えた水路である。この水路の中央に直立円柱を設置して、この円柱まわりの空間流速分布を2次元の後方散乱型レーザー流速計を用いて測定した。造波装置およびレーザー流速計のトラバース装置はパーソナル・コンピュータで制御し、測定精度を向上させている。本研究で、円柱に作用させた入射波は表-1に示される非線形性の強い保存波である。図-1に、直立

表-1 実験条件

水深 h	10.0 cm	円柱直径 D	4.8 cm
周期 T	1.5 s	最大流速 $U_{\max}$	167 mm/s
波高 H	3.8 cm		
Ursell 数	83.8	K.C. 数	4.8

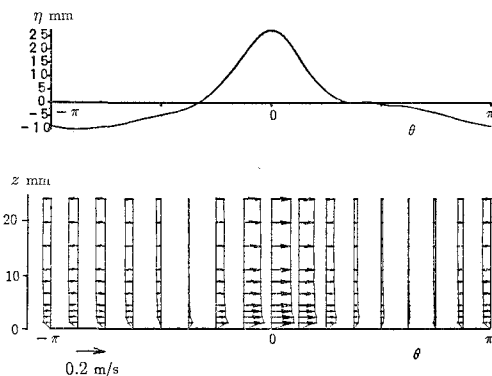


図-1 入射波の波形と底面近傍流速分布

* 正会員 工修 東京大学助手 工学部土木工学科

円柱設置前に行ったこの入射波の水面波形と底面近傍での流速分布測定結果を示す。ここで、設置後の直立円柱の中心軸を波の峰が横切った瞬間を位相 $\theta=0$ とする。

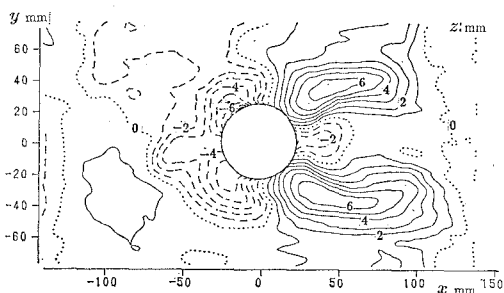
3. 測定結果

(1) 移動床での局所洗掘地形

レーザー流速計による直立円柱まわりの流速分布測定に先立ち、表—1 と同一の条件で移動床上の局所洗掘実験を行った。移動床には中央粒径 $d_{50}=0.2\text{ mm}$ の標準砂を用い、400 波作用させて局所洗掘を発生させた。得られた局所洗掘地形を図—2 に示す。この実験では、図のように円柱表面沖側斜め前面には最大の洗掘が、また岸側斜め前面には最大の堆積が生じた。西沢らの分類によればこの地形は堆積型の局所洗掘地形である。

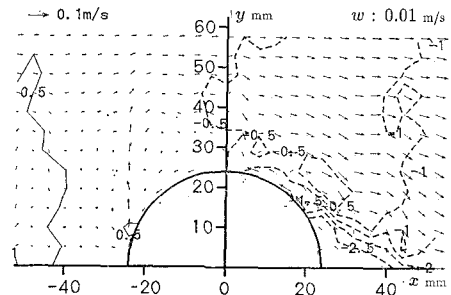
(2) 流速測定データ

表—1 の条件の下では、直立円柱まわりの流体運動は水路幅方向に対称であった。これは、岩垣・石田(1975)の研究結果でも $K.C.=4.8$ では1対の対称渦が発生することが示されている。そこで、水路幅方向には対称面の片側のみを測定領域とした。すなわち、円柱中心軸と底面との交点を原点とした座標で、岸沖方向： $x=-52\sim 52\text{ mm}$ 、水路幅方向： $y=0\sim 58\text{ mm}$ 、高さ方向： $z=1\sim 22\text{ mm}$ の空間を測定領域とし、この領域内の4960点の測定点で x, z 方向流速成分 u, w の2流速成分の測定を行った。個々の測定点では100波分の流速変化を測定し位相平均処理などを施して、その点での各位相ごとの平均流速分布などを求めた。今回の実験の条件の下では1波ごとの流体運動の再現性がきわめて高かったため、上に述べた操作により得られる各位相ごとの平均空間流速分布は瞬間流速分布とほぼ同じと考えられる。底面より高さ $z=2\text{ mm}$ と $z=8\text{ mm}$ の水平 ($x-y$) 面内流速分布の時間変化を図—3 に示す。ここで、 y 方向流速成分 v は測定された流速成分 u, w と連続式より算出した。その精度は u, w に較べれば劣るものの、 u, w の測定精度が十分高いので、 v も妥当な値が算出されている。図中 w は等値線で表わし、実線が上昇流 ($w\geq 0$) を、破線が下降流 ($w<0$) を示している。

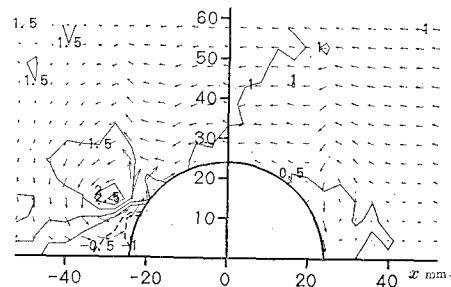


図—2 局所洗掘地形($d_{50}=0.2\text{ mm}$)

得られた空間流速分布では u, v 成分に関しては z 方向にあまり大きな変化は見られなかった。また、これらの図では位相 $\theta=6\pi/16$ 付近で円柱岸側に、また $\theta=25\pi/16$ 付近で円柱沖側に1対の剥離渦が観察される。これらの渦は円柱岸側の渦より沖側の方が強く、 $z=2\text{ mm}$ の水平面内の渦よりも $z=8\text{ mm}$ の渦の方が強かった。しかしながらこれらの渦は $z=22\text{ mm}$ ではむしろ弱くなっている(図—4)。



(a) $\theta=6\pi/16$



(b) $\theta=25\pi/16$

図—4 $x-y$ 水平面内の流速分布($z=22\text{ mm}$)

(3) 円柱表面での上昇・下降流

これらの測定結果でまず特徴的なのは全位相を通して円柱ごく周辺部で観察される下降流である。この下降流の生じている領域は各位相での主流の上流側斜め前方でありさらにこの領域自体も移流により下流側に移動している。そしてこの下降流を補償するような上昇流は、円柱よりやや離れた領域に広く弱く分布している。さらにこの下降流のピークを示す点は円柱の上流側斜め前方であり、対称面ではそれほど強い下降流は発生していない。一方、岸側($x>0$)では、対称面近傍においてこの下降流発生領域が移流された結果として下流側(岸側)の対称面内に下降流発生領域が集中している($\theta=6\pi/16$)。沖側($x<0$)では $\theta=25\pi/16\sim 27\pi/16$ の位相で剥離渦中心付近で上昇流が発生している。円柱ごく近傍でも比較的強い上昇流がみられるが、その発生位置は沖側後流域内の剥離渦中にみられる程度である。対称断面($y=0$)内の流速分布(図—5)には明確な馬蹄形渦が見られない。したがって、これらの上昇・下降流は馬蹄形渦に起

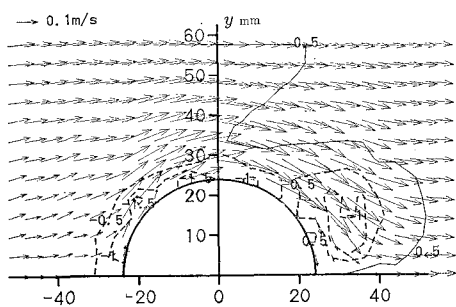
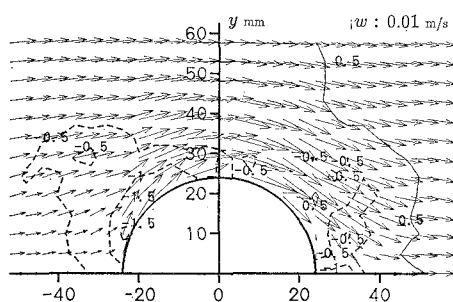
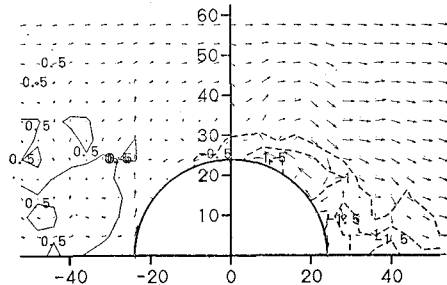
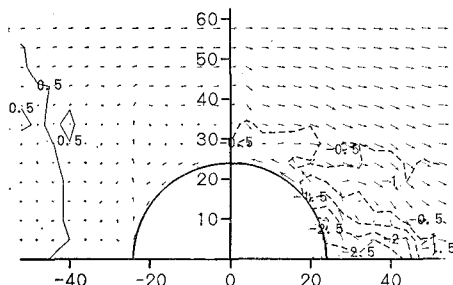
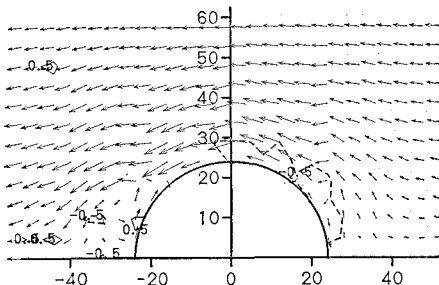
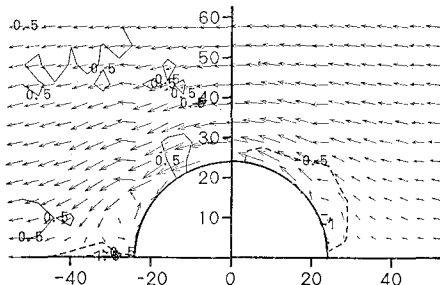
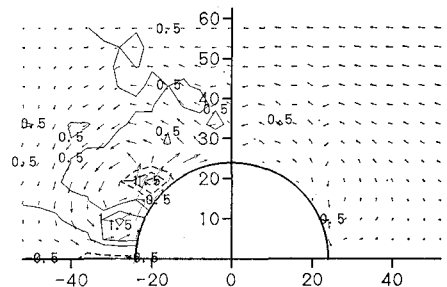
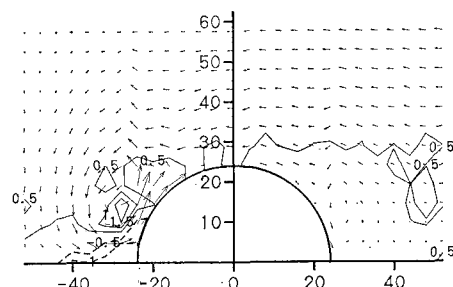
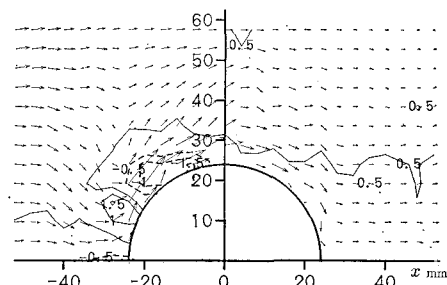
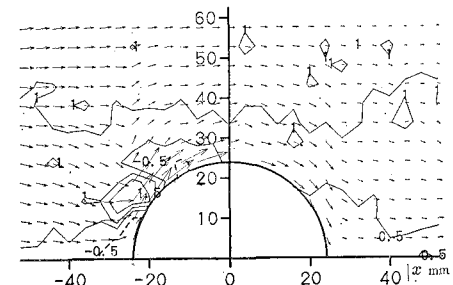
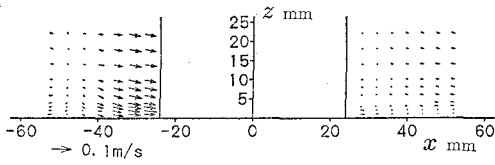
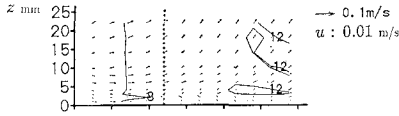
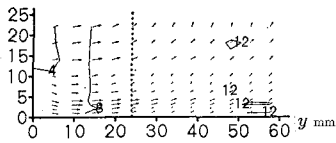
(a) $\theta=0\pi/16$, $z=2\text{ mm}$ (f) $\theta=0\pi/16$, $z=8\text{ mm}$ (b) $\theta=6\pi/16$, $z=2\text{ mm}$ (g) $\theta=6\pi/16$, $z=8\text{ mm}$ (c) $\theta=19\pi/16$, $z=2\text{ mm}$ (h) $\theta=19\pi/16$, $z=8\text{ mm}$ (d) $\theta=25\pi/16$, $z=2\text{ mm}$ (i) $\theta=25\pi/16$, $z=8\text{ mm}$ (e) $\theta=27\pi/16$, $z=2\text{ mm}$ (j) $\theta=27\pi/16$, $z=8\text{ mm}$

図-3 x-y 水平面内の流速分布の時間変化

図-5 対称断面($y=0$)内の流速分布($\theta=24\pi/16$)(a) $x=-32\text{ mm}$ (b) $x=-28\text{ mm}$ 図-6 $y-z$ 鉛直面内の流速分布($\theta=29\pi/16$)

因した流れではないことがわかる。

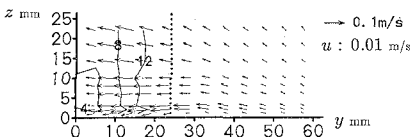
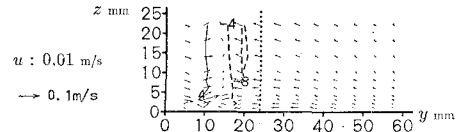
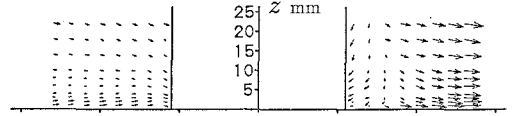
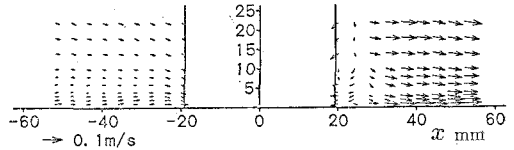
主流の波動による鉛直方向流速成分は $z \geq 3\text{ mm}$ で見られるようになり $z=22\text{ mm}$ ではその値もかなり大きい。円柱ごく近傍では依然円柱表面に沿う下降流が観察できる(図-4)。波動による鉛直流速成分が正である位相での円柱沖側断面の流速分布を図-6に示す。これらの図からは、波動による鉛直上向き流速も円柱沖側前面では円柱表面の下降流に抑制され、円柱の側面に回り込みながら上昇しようとする流体運動が観察された。

また、上昇・下降流の鉛直方向の一様性は弱く、波動による鉛直上向流速により測定領域上方で上昇流が発生している場合でも、円柱近傍の底面付近では逆に下降流が測定されている場合も少なくなかった(図-7)。

以上のような鉛直方向流速成分が発生する原因を議論するには、3次元的な渦度場はもちろん圧力場など様々な視点からさらに解析を進める必要がある。

(4) 円柱からの剥離渦

円柱岸側に発生した剥離渦を横切る鉛直断面内の流速分布を図-8に示す。これらの図中で、例えば $(x, y) = (28\text{ mm}, 14\text{ mm})$ の鉛直線上の流速分布では、測定領域の上部で主流と同じ向きの流速ベクトルを示しているのに対し、底面近傍の測定点で得られた流速ベクトルの向きはその点が剥離領域内に存在していることを示して

図-7 $y-z$ 鉛直面内の流速分布($x=28\text{ mm}, \theta=31\pi/16$)(a) $y-z$ 平面, $x=-28\text{ mm}$ (b) $z-x$ 平面, $y=10\text{ mm}$ (c) $z-x$ 平面, $y=14\text{ mm}$ 図-8 円柱岸側の剥離渦内の流速分布($\theta=4\pi/16$)

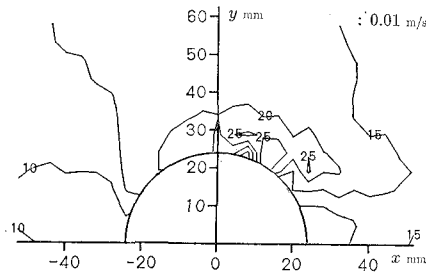
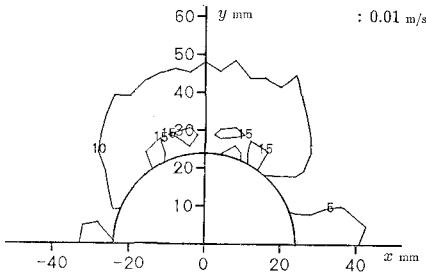
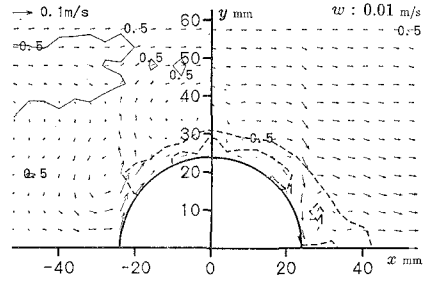
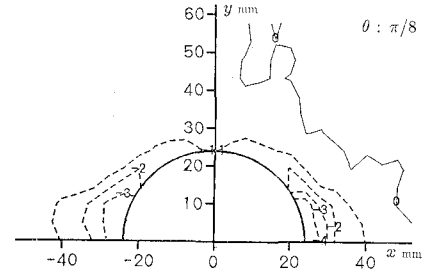
いる。この様子は $y-z$ 、 $z-x$ 両断面内の流速分布図にあらわれている。この流速分布のパターンは剥離域が底面近傍でやや広がっていることを示している。特に図-8からは、 $z=3\sim 10\text{ mm}$ の高さでの剥離域の広がりが比較的顕著となっている様子が読み取れる。この様な渦の振舞いは円柱の沖側に発生する剥離渦についても同様に観測された。これは、先に送った円柱の表面近くに生じている下降流により渦を含む流体部分が下方に集められるためと考えられる。

(5) 流速分布の統計処理結果

最後に、 $z=2\text{ mm}$ の水平面内流速分布を例に、いくつかの統計的処理を施した結果を示す。

まず、流速 $q = (\sqrt{u^2 + v^2 + w^2})$ の各点での最大値 $q_{\max}$ の分布を図-9に示す。これらの最大流速は、ほとんどの測定点で波峰通過時前後に生じているが、後流域や沖側の一部では剥離渦による誘導速度が最大の要因となって生じている。図-9では、空間的に最大流速が発生するのは円柱側面($x=0$)の点ではなく、やや岸寄りの側面上の点である。さらに各測定点での時間平均流速分布を示した図-10では、そのピークが空間最大流速発生点だけではなく、やや沖寄りの円柱側面上の点でも現われている。これらの点は図-2に示した移動床による局所洗掘実験時にそれぞれ堆積あるいは洗掘が最大となった地点である。

図-11に定常流成分の流速分布を示す。この図では円柱側面から岸側前面にわたる円柱表面上の幅広い領域で下降流がみられる。この定常流成分に現れる下降流は $z=22\text{ mm}$ の水平面内でもみられるが、その発生領域は円柱の岸側前面に後退・縮小している。またこの図では

図-9 最大流速 q_{max} の分布 ($z=2$ mm)図-10 時間平均流速 $\bar{q}$ の分布 ($z=2$ mm)図-11 流速の定常流成分の分布 ($z=2$ mm)図-12 流速 u の位相差の分布 ($z=2$ mm)

円柱沖側に発生した剥離渦が比較強かったため定常流成分として残っている。この剥離渦は測定領域中のどの水平面内の定常流流速成分分布にもみられた。

最後に各測定点における岸沖方向流速成分 u の位相差の分布を図-12に示す。この図から後流域において u の位相が時間的に前にずれているのがわかる。これは、円柱からの剥離渦が誘導する円柱中心軸に向かう流れのためである。本実験の場合、この渦の誘導速度のために後流域だけでなく、直立円柱まわりのやや広い領域でこの剥離渦の誘導速度により岸沖方向流速の位相が前にずれる傾向がみられた。

4. 結 語

本研究では、波動場における比較的小口径の直立円柱まわり底面近傍の流体運動を解明するために、レーザー流速計を用いた3次元空間流速分布測定を行った。その結果、円柱まわりの流れを特徴づける流体運動として円柱からの剥離渦とともに、円柱表面に集中している下降流が見いだされた。この下降流は波のほぼ全位相を通して生じており、円柱近傍でみられる現象の要因となっているものと考えられる。例えば、本測定により円柱からの剥離渦が形成する後流域は底面付近において広がっている様子が捉えられた。この現象にも円柱表面に沿う下降流が大きな要因として作用しているものと考えられる。また、測定データを統計処理することにより得られた、各測定点での最大流速が最も大きくなる地点、あるいは

時間平均流速が最大になる地点はともにポテンシャル理論で最大流速を示す円柱側面上の点と一致せず、円柱表面のやや岸側の側面、あるいはやや沖側の側面に位置していた。そして、これらの点の位置は移動床実験において洗掘あるいは堆積が最大となった地点であった。

これらが何を意味するのかを明らかにするには、今後、流体運動と砂粒子の運動との関係について研究・解析を行う必要がある。また、さらに局所洗掘現象の支配的要因である流体運動のメカニズムの解明をより進めるために、さらに測定データの解析を続ける必要がある。

最後に、本研究を進めるにあたり的確な助言をいただいた東京大学の渡辺晃教授、磯部雅彦助教授に謝意を表す。また、本研究は文部省科学研究費による研究成果であることを記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 岩垣雄一・石田 啓 (1975): 小口径円柱まわりの波圧分布と後流について, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 531~537.
- 宇民 正 (1976): 円柱橋脚前方における局所流の研究, 土木学会論文報告集第247号, pp. 61~70.
- 中川博次・鈴木幸一 (1974): 橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第17号 B, pp. 725~751.
- 西沢 勝・沢本正樹 (1989): 波による円柱まわりの局所洗掘, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 414~418.
- 横木裕宗・小林智尚・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 直立円柱のおかれた波動場底面上の渦運動, 第44回年次学術講演会概要集, 第2部, pp. 632~633.