

邊界混合過程影響漂沙之 實驗研究與現場觀測(一)

計劃主持人：徐進華

協同主持人：莊甲子

顧問：林坤地

研究人員：陳明宗

張國泉

張富東

邊界混合過程影響漂沙實驗

徐進華

摘要

一般認為在海岸地區造成沙運動最主要的因素是波浪及由波浪所引起的流，本篇報告將提出另一種影響沙搬運的機制，此機制乃由破碎的浪捲起海底大量沙粒，並因亂流混合作用形成一沙粒大致均勻懸浮的區域，此區域內的平均壓力將無法與外海無懸浮沙粒區的壓力相平衡，因而將導致混合區底部的水往外流，表層的水則由外海向混合區內補充，且由於壓力梯度在底層愈往下量愈大，故向外的流較集中在底部，因此此種平均環流除本身把懸浮沙粒往外海傳送外，亦使沈積在海底的沙經由剪應力作用向外傳送。

本篇報告首先以一個簡單但明確的理論分析顯示此種環流確可能發生，接下來並以實驗的方法來加以驗證，但本實驗在目前的階段僅以釋放染料的方式來觀察亂流區以外平均流的流況，此觀察雖曾受一些因實驗特殊佈置所產生額外流的影響，但仍足以顯示具有上述特徵的流的存在，且在目前實驗中所澄清的一些現象將為我們下一階段所要從事的定量觀測奠定一良好基礎。

誌 謝

本計劃在提出申請前曾獲美國 Applied Science and Engineering Research Inc. 負責人林坤地博士對計劃可行性及方向提供寶貴意見，故本計劃核准後即聘請林博士擔任顧問，因而有機會與他討論並獲得很多極有用的資料，對於林博士的貢獻，作者專此誌謝。本計劃的執行承蒙港灣技術研究所的張國泉先生不懈地協助，願在此致萬分的謝意。另外，在本計劃的執行期間，適逢美國北卡州立大學的董啓超教授訪問港研所，承董教授對本計劃有興趣，乃與作者在這方面做了許多極有益的討論，並協助實驗的進行，且在報告編寫時提供了寶貴的建議，為此作者敬表謝意。本研究報告的打字皆由港研所的楊怡芸小姐在百忙中完成，作者亦在此致萬分的謝意。

目 錄

摘 要	I
誌 謝	II
一.前 言	1
二.理 論 基 礎	4
三.實 驗	8
四.實驗的觀察	10
五.討 論	15
參 考 文 獻	18

一、前言

海岸地區沙的搬運與海岸線及海岸結構物的保護等有密切的關連，目前我們雖已知在海邊構築任何一個新的結構物，必將使附近海岸地形發生顯著的變化，但要預測此種變化一般仍超出我們目前的能力範圍。

要預測海岸線的變化需對發生在近岸海域內與漂沙有關的各種過程有深入的瞭解，以往認為這些過程皆與波浪及由波浪所引起的流有直接的關連，特別是由波所引起的沿岸流將導致沙沿海岸線搬運，故與海岸線長期的演變有密切的關連，但沙在垂直海岸線方向的搬運仍與沿岸搬運有相互的關連，故我們須對兩者皆加以考慮。

一種與沙沿岸及離岸搬運皆有關的現象是，在碎波帶由浪破碎後所形成的大尺度渦流將捲起大量底部的沙，然後在較小尺度的亂流旋渦作用下擴散成大致均勻懸浮的狀態 (Shibayama, Higuchi & Horikawa 1986)，此種現象已知是影響碎波帶沙沿岸及離岸搬運的主要因素，但其詳細的過程目前仍未被充份理解。另一個與其有關的現象是在大部份海岸的碎波點附近皆有bar形成，此種bar形成後對波浪場及流場將產生極大的影響，如使入射波產生 resonant Bragg reflection (Mei, 1985)，因此使海岸地形發生複雜的變化。形成此種 bar的原因以往認為與捲入型碎波 (plunging breaker) 有密切的關連，但新近的實驗顯示溢出型碎波 (spilling breaker) 亦產生此種bar (Horikawa 1988)，故我們對形成此種bar的詳細過程仍有待瞭解。

以往有關漂沙機制的模式皆視懸浮沙粒為一被動的角色，即它們被碎波激起後僅受原來的流影響向各方傳送，但目前我們將考慮一種特殊的動力過程，在此過程中懸浮沙的質量和運動將影響平均流，但我們無需考慮每一個沙粒個別的運動。

當比重大於水的沙粒懸浮在亂流場中時，儘管它有時被加速，有時

被減速，但平均來說需承受一較靜水中「浮力」大的作用力，以克服重力的影響，此項作用力原以黏滯力和壓力兩種方式進行，但前者的平均效應大部份仍將由水中的平均壓力來平衡(其餘者由雷諾應力(Reynolds stress)平衡)，並傳遞至底床，故懸浮沙粒在效果上如改變了亂流混合區內水的密度(一個較詳細而嚴密的討論將留待下一節)，故以平均效應來說，沙粒懸浮在水中和氯化鈉溶解在水中應有類似的地方(自然亦有不同之處)，有關鹽水和淡水在邊界混合產生平均環流的現象，已有很多人做過這方面的實驗(如 Ivey & Corcos 1982; Thorpe 1982; Phillips, Shyu & Salmun 1986)，本篇報告將首次探討由懸浮沙粒所引發的平均環流，此種平均環流將使碎波帶底層的水向外流，表層的水則由外海向岸邊補充，前者且集中在底部，故此種環流除本身把懸浮沙粒往外海帶以外，尚可藉剪應力作用將沈積在底床的沙粒亦向外搬運，故此種流極可能與在碎波點附近所形成的bar有關。

由沈積物引起「密度流」以往曾在一些處理工業廢水的沈澱池中被加以觀察(Nemerow 1978)，DeVantier & Larock(1987)針對此且建立了一個可用來實際計算的數學模式，此模式亦將懸浮沙粒的效應用變化水的密度來代表，但為了計算的方便，它採用了類似於Boussinesq approximation的處理法，即在計算慣性力時仍以淨水的密度代入，僅在計算水的重量時，以水和沈積物兩者的平均密度(按比例計算)來代入。DeVantier & Larock另外也使用eddy viscosity的觀念來解決亂流封閉的問題，故在如此多假設下，他們的解雖顯示有平均流產生，且提供了其詳細的分佈，但此種數學模式是否能代表真實現象仍有待驗證，且其所含的物理及動力上的意義仍有待澄清。在本篇報告裡我們將僅考慮流體的基本物理性質及基本的運動定律(含亂流的情況)，並做一些簡單的假設，如此可清楚地顯示懸浮沙粒如何引起平均環流，且其基本特性為何

◦ 爲了提供更明確的証據，我們且做了一項實驗，此項實驗目前僅以染料做定性的觀察，但未來將從事一些定量的觀測，並配合發展進一步的理論。

二. 理論基礎

當一個亂流場亦同時存在有懸浮沙粒時，其問題的複雜度甚至超過一般的亂流，其所增加的困難有二：一是我們無法事先知道任何單獨一個沙粒的運動，故流體運動的邊界無法確定(interface的問題)。另一個困難是在此種由固體粒子及液體共同組成的流場中，以往連續體的假說將無法適用(two-phase的問題)。為克服以上兩個困難，我們在下面將採用一種更巨觀的尺度(連續體假說即代表一種巨觀的模式)來考慮流場的平均性質。

一般連續體假說是根據如圖一所描述的狀況而建議(詳細的說明請參閱Batchelor 1967, § 1.2)，在圖一中儀器感應流體性質的體積一般可小至使其所測得的量屬local，但仍包含大量流體組成分子，故其所測得的值不會因各個分子性質不同而有所變動，此種特性再加上一般我們僅關心流的巨觀行為(相對於分子的尺度)，因此可將感應體積內物體的質量和動量等視為均勻分佈於此一體積內，而不考慮流體質素等實際僅集中在各個原子核內。

上述的觀念可加以延伸，首先我們假設懸浮沙粒的濃度和其他物理量在空間上變化的尺度很大，因此可以將「感應體積」定義的較大，使其包含大量的懸浮沙粒，但在此體積內所感應的物理量仍為local(這裡所謂的物理量應指水和沙粒兩者按比例之平均值)，因此若我們僅關心大尺度的行為(如平均流)，亦可將沙粒和水兩者不加以區分，僅將感應體積內兩者物理性質之平均視為均勻分佈於此一範圍內。

在連續體假說下，流體的各項性質可用一些空間和時間的連續函數來代表，因而可建立控制其運動的方程式，這些方程式與流體實際粒子的構造無關，故同樣地，若一類似的連續體假說亦應用到有懸浮沙粒存在的水中，則我們雖無法計算各沙粒和各流體element之運動，仍可建立

有用的控制其平均運動的方程式，且其運動方程式的形式應與以往的連續體之運動方程式相同，特別是當應力張量未用某一特別的應變速率的表式來代入時，故我們可獲得

$$\overline{\rho} \frac{DU_i}{Dt} = \overline{\rho} F_i + \frac{\partial \Sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.1)$$

其中 $\overline{\rho}$ 和 U_i 分別代表當感應體積很大時 "local" 的密度和速度， F_i 為作用於每單位質量的 volume force，它在目前即為重力加速度，此外 Σ_{ij} 代表作用於由沙和水混合所形成的 element 之表面上的應力張量，此張量在無亂流和無懸浮沙粒時是來自於流體分子與分子間的作用力，或由分子在邊界上進出所導致的動量傳送，而當有亂流產生時， Σ_{ij} 應包含由亂流擾動部份所產生的 Reynolds stress，若更進一步，在亂流中有懸浮沙粒時，則 Σ_{ij} 尚應包括沙粒在邊界進出所挾帶的動量以及複雜的流體和固體相互作用的效應，對於以上三種經過表面的動量傳送過程我們無法詳細瞭解其中任一種，僅第一種由分子作用所產生的黏滯應力張量 (viscous stress tensor) 已由現象學的方法 (phenomenological approach) 建立其與應變速率的關係，有關 Reynolds stress 的表式雖經許多人長期的努力仍未獲致令人滿意的結果，至於第三種過程則更為複雜，故我們不欲在此決定 Σ_{ij} ，僅打算對其部份性質加以分析。

如對傳統的應力張量一樣，我們將 Σ_{ij} 分為兩部份

$$\Sigma_{ij} = -P \delta_{ij} + D_{ij} \quad (2.2)$$

等號右邊第一項代表等向性 (isotropic) 應力部份，第二項則為非等向性部份，它包含原應力張量中的切線應力及一部份的垂直應力；後者的總

和爲零。在傳統的應力張量中與 P 相對應的量被稱爲壓力，由於我們在上面仍將使用「平均壓力」一詞來代表水中真正壓力的平均值，故 P 在此僅以符號相稱。由上述的討論我們可瞭解 P 的量有三個主要的來源：第一個來源爲作用於水和沙粒上真正壓力的平均值，第二個來源是水粒子進出界面所帶進或帶出的垂直動量，而第三個來源則是沙粒進出界面所狹帶的垂直動量，要注意的是後兩種來源並非完全加諸在 P 值上，其一部份的量尚與 D_{11} 、 D_{22} 和 D_{33} 的值有關，究竟有多少量加諸在 P 上目前我們無法得知，但由於後兩種來源皆與當地亂流的強度和沙的濃度有直接的關連，而第一種來源（即真正的壓力）則是和水份子的振動及水分子與水分子間或水分子與固體分子間的作用力有關，故它們可在極短的時間內進行，因此我們可以預期最能配合外在條件調整其大小的將是第一種來源（在流體運動方程式中所出現的各種力裡，壓力即通常被視爲扮演一被動的角色），此種性質可使我們在一些簡單的狀況下，對平均壓力的分佈粗略地加以估計。

最簡單的一種情況是，當亂流的強度以及懸浮沙粒的濃度在空間上爲均勻分佈，且平均流 U_i 爲零時，此時(2.1)式將簡化爲

$$0 = - \bar{\rho} g - \frac{\partial P}{\partial x_3} \quad (2.3)$$

上式中volume force F_i 已用重力加速度 $\bar{g}$ 取代，且令 $\bar{g}$ 的方向爲負 x_3 軸的方向，此外，由於均勻分佈的假設，所有空間梯度的項，除 $\partial P / \partial x_3$ 外，皆可消去，後者實際僅平均壓力（記爲 $\bar{p}$ ，即第一種來源）的梯度不爲零，因此我們可獲得

$$\bar{p} = \bar{p}_0 - \bar{\rho} g x_3 \quad (2.4)$$

其中 $\bar{p}_0$ 代表在 $x_3=0$ 深度上的平均壓力，上式若不考慮亂流強度及懸浮沙粒濃度是否能在現實中達到均勻分佈的問題，乃為一準確的解，此解的形式雖然很普通，但它確顯示，當有懸浮沙粒時，水中平均壓力的分佈將與一種假想的密度為 $\bar{\rho}$ 的連續體之靜壓力分佈相同。

接下來一種情況是，若亂流的強度以及懸浮沙粒的濃度受自由表面和底部邊界影響，在垂直方向有變化時，(2.3)式需改寫為

$$0 = - \bar{\rho} g - \frac{\partial P}{\partial x_3} + \frac{\partial D_{33}}{\partial x_3}$$

此時 $\partial P / \partial x_3$ 尚包含前面所提到的第二種和第三種來源，但這些來源以及上式中最後一項皆與local的性質有關，而與懸浮沙粒的整體分佈無直接的關連，故我們仍可預期平均壓力 $\bar{p}$ 的分佈大致上仍具有如圖二左邊所描述的特性，在圖二中，左邊代表有亂流及沙粒懸浮的區域（亂流如何產生我們暫且不考慮，我們且暫時想像有一道無形的牆將左右兩區域隔開），在右邊則假設兩者皆不存在，圖中左右兩邊各等壓線間的增值 $\Delta \bar{p}$ 皆相等，故在右邊， $\bar{p}_1$ 和 $\bar{p}_2$ 兩條等壓線的距離與 $\bar{p}_2$ 和 $\bar{p}_3$ 的距離相等，但在左邊，因亂流強度分佈不均勻，故各等壓線的距離應不相等，但大體上在此區域內等壓線間隔應較小，特別是在左邊亂流極弱（故第二、三種來源亦極小）的底部之壓力將較右邊的壓力大，因此形成一高壓區，此高壓區若無其他應力分量梯度加以平衡，則（當無形的牆移開後）在左右兩區交界附近將引發一個平均環流，目前由於亂流強度在垂直方向有變化，應力分量梯度 $\partial \Sigma_{13} / \partial x_3$ 確不為零，此分量將使平均流產生 x_1 方向的加速度，故可抵消或增強上述的平均環流。但我們很難期待此分量以及其他在交界區附近所可能產生不為零的分量（皆為local的效應），能完全與上述的平均壓力梯度（代表大範圍的狀況）相平衡，故平均環流理應發生。

三. 實 驗

爲証實以上的效應，我們在圖三所示的水槽內進行初步的測試，此水槽的內徑爲500公分長，18公分寬及30公分深，由於目前實驗的性質不屬於一種模型試驗(model tests)，即我們並非希望將實驗的觀測結果直接轉換爲自然界的值，而是在探討一種特殊的物理過程，故本實驗可在一小槽內進行，且在選擇沙粒時，不必考慮scale factor，目前所使用的沙是在海邊靠近海堤處所收集者，一部份的沙曾加以篩選(並清洗)，使粒徑約爲0.15mm，但其餘者大部份(90%以上)仍屬於此一範圍的粒徑，故兩者相差不大。

在目前的小水槽內，爲有效激起這些沙，需採用機械的方式來產生足夠強的亂流，且爲了傳動方便起見，我們設計用一變速馬達帶動一塊沿斜坡放置的粗糙面來產生亂流(見圖三)，此粗糙面是附著在一塊0.5公分厚的壓克力板上兩者共同組成一個振動板，壓克力板和粗糙面的寬度都接近於水槽的寬度，另外，爲了將斜坡上下空間隔離，我們且在振動板和一個用于支持此斜坡的鋼架間另放置一塊0.8公分厚的壓克力板，此壓克力板和水槽兩壁間的空隙且用塑膠布密封。此種設計由於振動板本身已有支撐，且兩塊壓克力板間有水加以潤滑，故可省略其他導桿或軸承的裝置，僅需使用一偏心輪及連接桿來將馬達迴轉的運動轉變成往復的運動，此偏心輪的半徑亦可調。

振動板上的粗糙面我們最初是使用一種類似於 Phillips et al.(1986) 實驗裡所使用的腳墊，但隨後發現在目前的狀況，即使將振幅和頻率調至相當大，此種粗糙面仍無法將沙粒自水底激起約五公分以上的高度(少量的沙可超過此一高度)，故爲有效解決此問題，我們以後採用一組由正方形網格組成的柵欄陣列，此柵欄是用寬0.5公分厚0.8公分的壓克力條製成，網格空隙的邊長爲1.5公分，此組柵欄在以螺絲釘銼在振

動板上後，其外觀如圖四中的相片所顯示，相片中各柵欄的高度大致維持與水面相同的距離，柵欄與柵欄的距離(由中心線算起)為8公分，此距離經測試後發覺為一較理想者。此種設計由於在各深度皆可製造擾動，故只要振動的頻率和振幅足夠大，底部的沙將可輕易被激起至一深度超過10公分的水面。

在裝置好振動板並加自來水到水槽內後，我們接著在佈置有柵欄的區域(即預定產生亂流的區域)鋪一層約0.5至1公分厚的沙層(水愈淺處沙層愈薄)，由於沙在馬達開啓後將逐漸流失到亂流區以外，故我們原先亦使用漏斗在馬達開動後繼續自水面補充沙到亂流區內，但以後我們發現，由於目前所採用的觀測方法僅允許我們在實驗開始的第一分鐘內，做有效的觀測與記錄，因此沙的補充至少在目前已變為不需要。

目前我們所採用的觀測方法是在亂流區以外，每隔10公分同時釋放10組經篩選過的過錳酸鉀的微小顆粒，這些顆粒在沈降過程裡將逐漸溶解，因而形成10條染料線，觀察這些染料線隨時間的位移即可看出平均環流在亂流區以外大致的軌跡，這些位移我們且以一個可定時拍照的照相機來加以記錄。由於染料最終將使水變得很混濁，因此我們在一正式實驗裡，僅能以釋放一次染料為限，且在亂流區內，由於染料擴散的極迅速，故染料在進入亂流區後即無法觀察(用肉眼尚可，用照相機則很困難)，此問題日後必須用定量觀測的方法來解決。

四. 實驗的觀察

4-1. 沙粒粒徑的影響

在正式實驗前我們曾做一些預備性實驗，以測試各種效應，首先測試的是粗糙面激起沙粒的效應，當我們發現最初所選擇的粗糙面無法有效地將沙激起後，曾嚐試用高嶺土(kaolin)做為沙的代替品，但實際使用後發現，由於顆粒太細，高嶺土雖極易被激起，但在離開亂流區以後，大部份仍如圖五般處於懸浮的狀態，並引發沿斜坡而下的密度流，此種密度流與我們目前所要研究的由僅在碎波帶懸浮的沙粒所引發的平均環流不同，因此我們決定仍使用自然的沙，但改變振動板的設計，以產生較大的亂流。圖五中綠色的底床即為我們早先使用的粗糙面。

4-2. 底床往復運動的效果

在測試粗糙面的功能時，我們亦觀察到兩種效應可能干擾我們所要觀測的現象：一種效應是在非亂流區沈積在底床上的沙粒，因底床的往復振動而沿斜坡滾下，此種現象在自然界不會發生（因由波浪所引起底部水的周期運動不會如此大，且沙粒在實際海底較在壓克力板上不易滾動）。另一種效應則仍是因沙含有極微小的顆粒，故而形成類似於圖五的濁流(turbid flow)。此兩種效應雖可部份地加以控制（如將振動板自擾動區以下截去，及使用清洗過的沙），但要完全將兩者自本實驗中消去仍有困難，因此我們曾在一實驗裡單獨測試此兩種效應，以便日後加以比較。

圖六即為在此測試中所拍得的一系列相片，在此測試中我們將沙自水面傾倒在亂流區下方的斜坡上，故沙的運動不受粗糙面所產生亂流的影響，僅細的沙在沙沈降過程中所激起的微弱亂流裡形成濁流，另一方

面沈積在底床上較重的沙，因底床的往復振動，而沿斜坡滾下來，其滾下來的速度應比濁流的速度大，但由圖六可看出，由於滾下來的沙量太大，故仍不斷地(經由亂流)激起細微的沙，故圖六實際代表上述兩種效應的疊加，但由這一系列的相片可看出，濁流和沙粒的滾動實際僅能使其前方很短距離內的水產生運動，且它們對後方水流的影響較大。另外我們這裡要指出的是，由我們後面所做的實驗(圖十三)顯示，當沿斜坡滾動的沙粒數量不多時，將無明顯的濁流生成，此時染料線受沙粒通過的影響極輕微。

4-3. 振動板前緣的效應

爲了降低底床振動的影響，我們將振動板下半段無柵欄的部份截去，且爲避免振動板的前緣在振動時產生劇烈的擾動，我們特將其前緣修剪的極尖銳，但儘管如此，我們仍能在振動板的前端看到如圖七所顯示的旋渦(vortex)，此時亂流區未放沙，故此旋渦是因條件的不連續，使由固體邊界所產生的渦旋度(vorticity)無法在往復運動中抵消，因而產生一個不爲零的平均渦旋度。此種現象即使將振動板延長(即將原截去的部份保留)，亦無法避免，實際上此種很強的旋渦在以往很多用機械方式產生亂流的實驗裡皆可觀察到(例如 Hopfinger & Toly 1976; Ivey & Corcos 1982)，因此很難加以消除。

除水中旋渦外，由柵欄陣列裡頭尾兩柵欄也將使水面起較劇烈的波動，此種現象推測亦是因兩者各自在一方無其他柵欄的運動來補償它們的運動，因此它們所造成的擾動效果較顯著，在圖四的相片裡，頭兩個柵欄的高度較小，其作用即在設法降低此種擾動，但其效果有限。由於此種額外的擾動，特別是引起水面起伏的部份，大抵爲非旋性，故我們可在振動板前緣附近的水面設置一塊消能板(見圖四與圖七)，此消能板

是以我們用來製造亂流的柵欄所製成，它在表面張力作用下，可有效地使水面平靜下來，但我們在一些實驗裡也不曾使用它，其影響並不大。

4-4. 溫度的效應

圖七是無沙僅開動馬達情況下所拍攝的相片，當我們以第三節所敘述的方式放沙到水槽裡，並開動馬達後，拍攝到圖八裡的一系列相片，此組相片裡的染料變化，若不仔細觀察，與圖七無太大的差別，但我們早先曾在一些預備性實驗中觀察到所有染料皆呈一種明顯且規則的變化，因此我們不禁懷疑在圖八的實驗裡，是否因我們未在第一個柵欄和第二個柵欄間放沙，且在其他地方沙放的較少，再加上振動板前緣強大旋渦的影響，因而使平均環流無法出現，故我們緊接著又做了一次實驗，結果有圖九所顯示的環流出現，此環流的方向與我們所預期者相同，但爲了慎重起見，我們在以後又做了很多次實驗，在這些實驗裡，所有放沙的實驗皆顯示有類似於圖九的環流出現，但令人驚訝的是在沒有放沙時，或甚至振動板不曾啓動時，我們有時依然可看到有明顯的大尺度環流出現，例如我們曾在同一天下上午測試兩次不加沙且不振動時的染料變化，得到圖十a和圖十b兩種截然不同的結果。圖十一則是測試不加沙但振動時的狀況，在這兩次實驗裡，爲了避免振動板尖端的效果，我們將整組柵欄移至較高的位置，並將水槽內的水加高，但同樣地，兩次實驗的結果仍不同，這使我們相信唯有溫度才可能造成此種差異。

由於本實驗是在一隔熱效果不佳，且無中央空調系統的實驗室內進行，故原先我們未嚐試使水溫和室溫保持平衡，但如今我們發現，若水溫較高(實驗室的水是來自屋頂上的水塔)，室溫較低，則水中的熱量將向外傳，故淺水區的水溫將首先降低，而深水區水面的水雖也因與空氣接觸及蒸發使溫度下降，但由於對流效應使上下層水的熱量迅速交換，

故深水區的水溫將比淺水區的水溫下降的慢，因此在淺水區的冷水將沿斜坡往深水區底部流，形成如圖十b和圖十一b的現象。當室溫較水溫高時，上述的現象即不會發生，這足以解釋為何在下午兩三點所做的實驗，大尺度環流較不易出現。

4-5. 沙中含鹽的效應

發現了上述效應後，我們即在每次做實驗前先將水放入水槽內，俟其過夜，然後在第二天(或隔一個週末)早上進行實驗，由於早上的氣溫通常將逐較升高，故通常較已在室內過夜的水溫高，但我們在做實驗前仍以溫度計測量水槽兩端的水溫以及氣溫，並在開動馬達前，先在距離柵欄較遠的位置放一條染料，觀察是否有溫度流產生，圖十二裡前三張相片即為此染料隨時間變化的情形，在証實了無明顯的流存在後，接下來我們即進行正式的實驗，圖十二裡其餘的相片即為其結果，此實驗未加沙僅用振動板產生亂流區，相片中很明顯無大尺度環流出現。兩天後我們且以同樣的步驟來測試亂流區有懸浮沙粒時的狀況，在這次實驗裡，我們先以少量的染料証實無溫度流存在，接著立即在柵欄區鋪上一層沙(沙原先存放在實驗室內)，在鋪好沙以後，為了確保在這段時間內無明顯的溫度變化，我們又做了一次溫度和染料的測試，當溫度沒有異常現象出現時，我們卻由染料的測試裡觀察到如圖十三a的變化，此變化即使用很少量的染料測試很多次，皆重複地出現，因此顯示底層有一股流沿斜坡往下流，由於我們注意到此時底層的水和上層的水一樣清澈，故此種流應不是前面所提到的濁流，極可能是沙中所含鹽份溶解到水中所形成的密度流，這或許可以解釋為何在以前所有有放沙的實驗裡，無論是在何時做，幾乎(除少數使用清潔沙的實驗)都有大尺度環流出現。

此種由溶解的鹽份所形成的密度流，將隨時間逐漸減弱，故我們在

等待了約兩個小時後發現此種流已極微弱；此時所做的染料測試已如圖十三b、c、d所顯示幾乎完全不動，因此我們立即進行正式的實驗，圖十三裡其餘的相片即為這項實驗所獲得的結果，這些相片清楚地顯示，圖九裡的大尺度環流目前已無法產生。

在圖十三的實驗裡，柵欄陣列被裝在振動板較高的位置，故沙粒離開亂流區以後將在振動板上繼續滾動(參考 § 4-2)，但圖十三顯示這些滾動的沙，因量不大，故不會引起如圖六般的濁流，且這些在底床上滾動的沙對染料線的影響也極輕微，故我們日後除有特殊需要應不必將振動板截短；使用較長的振動板可避免沙在擾動區前緣形成bar，而使實驗無法繼續進行(但我們仍應記住在自然界實際將在碎波點附近產生bar)。

五. 討 論

在上述觀察裡，我們已將發生在水槽裡各種可能的現象加以澄清，且對部份現象加以控制，其中最顯著的一個現象是如圖九所顯示的幾乎橫跨整個水槽的環流，此一大尺度的環流如今我們已瞭解，乃因流體的elements持續受到負的浮力(buoyancy)作用所產生的結果，由此我們可推測，當亂流區有放沙時，由亂流區與外界間「有效密度」差所產生的平均環流應僅侷限在兩區交界附近；因離開此區域，原driving force即消失，故流在黏滯力作用下將迅速地減速，另一方面，為滿足流體連續方程，壓力場將做額外的調整，使最終產生一封閉的環流。

由「真實密度」差所產生的大尺度環流，除可被控制外，更因其流速小，故實際對我們所欲觀察的平均環流不會產生很大的影響，真正對我們觀察有影響的是發生在柵欄陣列前如圖七所示的旋渦，此旋渦的流速大，且發生在亂流區邊緣，再加上它旋轉的方向與我們所預期的環流方向相同，故兩者在目前的定性觀測中很難加以區分，但我們若仔細比較圖七和圖九，仍可找出由懸浮沙粒引發平均環流的證據。

圖七和圖九的實驗所採用的振動頻率相同，僅圖七的振幅略小於圖九(我們曾做過與圖九條件完全相同的不加沙的實驗，但在該實驗裡染料放的不理想，故我們在此選擇發生的狀況相同，但此較清楚的圖七來解說)。在目前我們需特別注意離交界區最近的第一和第二條染料，圖七中第一條染料的軌跡幾乎在柵欄前形成一封閉的橢圓形，但在圖九裡我們看到第一條染料除受柵欄前旋渦影響外，且繼續朝向亂流區移動，由圖九b--f這幾張相片我們可清楚地看到，第一條染料通過旋渦的上方後，繼續向左移，最後進入到有沙粒混合的區域，在此區域內染料受強烈亂流影響極迅速地擴散至無法辨認的地步。上述的現象亦出現在圖九的第二條染料上；而圖七的第二條染料已因擴散過甚而無法形成一條可辨認

的跡線，但很明顯地這些染料大部份皆未進入到有強烈亂流的區域。這裡我們且注意到，當柵欄區有放沙時，柵欄陣列前的微弱亂流將變得更弱，使染料較不易擴散，這可能與懸浮沙粒消耗掉一部份擾動的能量有關。

圖九的相片裡雖有由溫度(可能包括鹽度)所引發的大尺度環流，但它應不影響我們上述的討論，且即使在無大尺度環流存在的圖八裡，我們亦可觀察到同樣的現象，圖八和圖九不同之處在於前者所放的沙較少，故由懸浮沙粒所引發的環流應較後者弱。另外，在圖十三的相片裡，雖因染料少而看的較不清楚，但仍可顯示其第一條染料較圖十一a和b的第一條染料往混合區移的較遠，故所有這些跡象皆顯示，當有懸浮沙粒時，除在柵欄陣列前方因振動形成一旋渦外，尚有另一種平均流延伸至亂流區內。

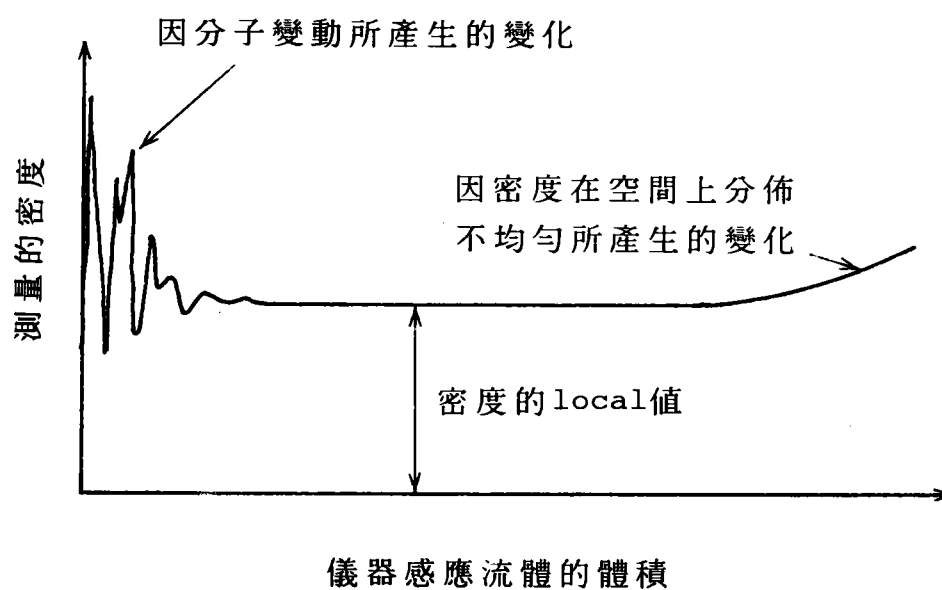
以上的討論僅由觀察染料的位移而來，實際上，若觀察亂流區邊緣沙的分佈，亦可發現有平均環流存在的証據，例如在圖九的所有相片裡，沙粒混合區與外界有一十分明顯且穩定的界限，且我們可清楚地看到沙僅由混合區底層流出，而在稍高處絕無懸浮的沙粒向外擴散，此點顯示在上層有一相當強的平均流往內流，使懸浮沙粒僅能向外擴散到亂流強度較大的位置(大約在最後一道柵欄所能到達的位置)，另外在圖九和圖十三裡沒有出現如圖六中沙蜂擁地沿斜坡往下的運動，亦顯示有一股流在抑制沙的運動，此種流絕非和柵欄陣列前的旋渦有關；後者在圖九(或更清楚在圖十三)裡可由自底層流出的懸浮沙的分佈看出其大致的範圍。由於我們在圖九中是使用經篩選且清洗過的沙，而柵欄前的振動板也已被截短，故沙自混合區底層流出後即大部份沈積在不動的底床上，僅很少量的細沙隨旋渦運動，故在圖六中曾出現的流在此也應不顯著(圖十三使用延長的振動板所獲得的結果亦可供參考，雖那時使用未經篩

選的沙),因此我們推測造成沙粒混合區與外界有一明顯且穩定界線的主要原因僅能是由懸浮沙粒所引發的平均流,此平均流的特性與我們在第二節所做的理論分析亦符合。

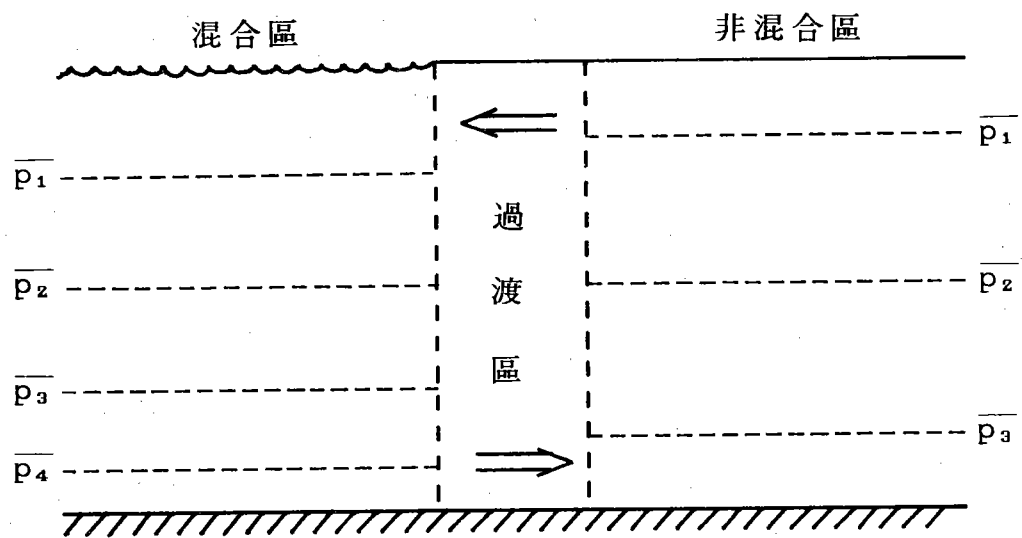
在實際自然界我們也經常看到,當海邊有大量沙粒懸浮時,海水的顏色往往有一道極明顯的界線,當然在實際的海岸地區,沙粒的混合應不似在實驗水槽內那般均勻,此種不均勻將使平均環流的範圍加大(雖流速減小),而影響更大區域內沙的搬運。由第二節的理論分析及上述的討論我們亦可瞭解,此種由懸浮沙粒所引發的平均環流不限於發生在斜坡上,故若因某種原因(如由一近岸島嶼對入射波形成一遮蔽區)使沙粒的混合在沿岸方向不均勻時,亦可能由平均壓力的不平衡引發沿岸方向的平均流,導致沙沿岸搬運,但要估計這些過程的效應,仍有待我們日後採用定量觀測的方法來建立其關係式,並提供更確切的証據。

參 考 文 獻

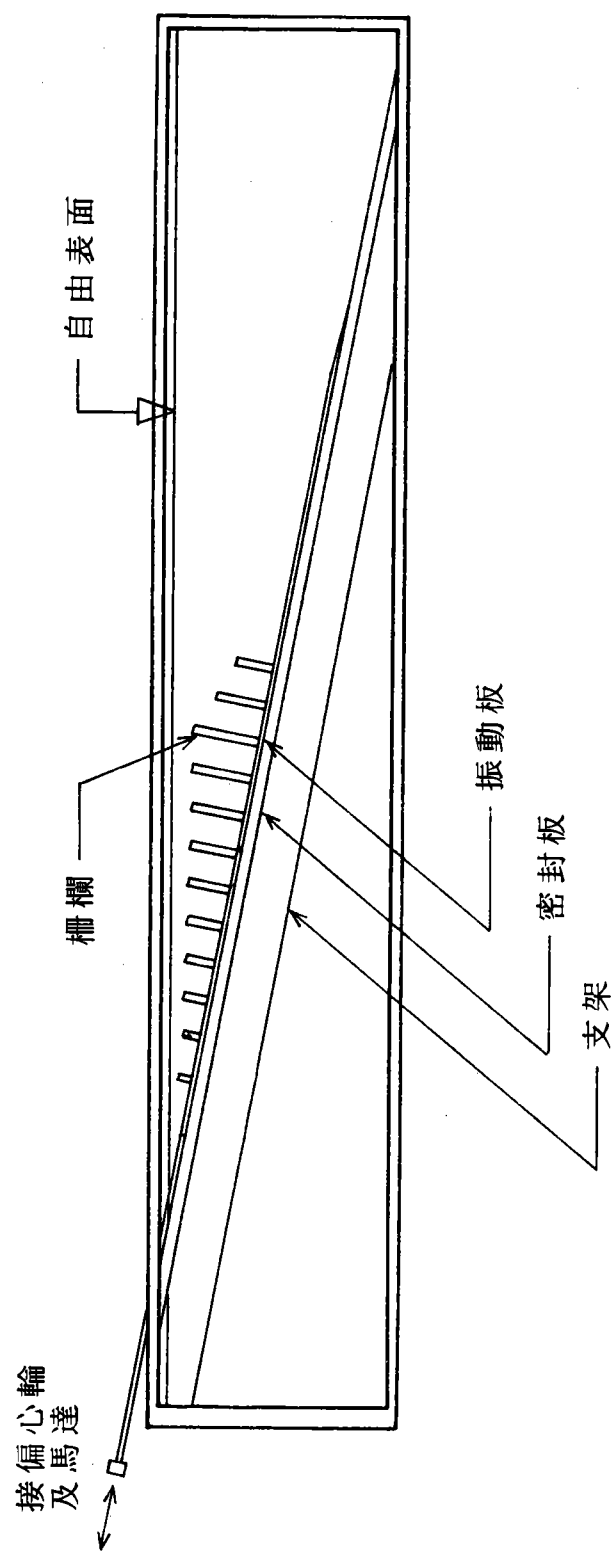
- Batchelor, G. K. 1967 *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.
- DeVantier, B. A. & Larock, B. E. 1987 Modeling sediment-induced density currents in sedimentation basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. 1, 80-94.
- Hopfinger, E. J. & Toly, J. A. 1976 Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interfaces. *J. Fluid Mech.* **78**, 155-175.
- Horikawa, K. (ed.) 1988 *Nearshore Dynamics and Coastal Processes*. University of Tokyo Press.
- Ivey, G. N. & Corcos, G. M. 1982 Boundary mixing in a stratified fluid. *J. Fluid Mech.* **121**, 1-26.
- Mei, C. C. 1985 Resonant reflection of surface water waves by periodic sandbars. *J. Fluid Mech.* **152**, 315-335.
- Nemerow, N. L. 1978 *Industrial Water Pollution*. Addison and Wesley Publishing Co., Philippines.
- Phillips, O. M., Shyu, Jinn-Hwa & Salmun, Haydee 1986 An experiment on boundary mixing: mean circulation and transport rates. *J. Fluid Mech.* **173**, 473-499.
- Shibayama, T., Higuchi, A. & Horikawa, K. 1986 Sediment suspension due to breaking waves. *Proc. 20th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1509-1522.
- Thorpe, S. A. 1982 On the layers produced by rapidly oscillating a vertical grid in a uniformly stratified fluid. *J. Fluid Mech.* **124**, 391-409.



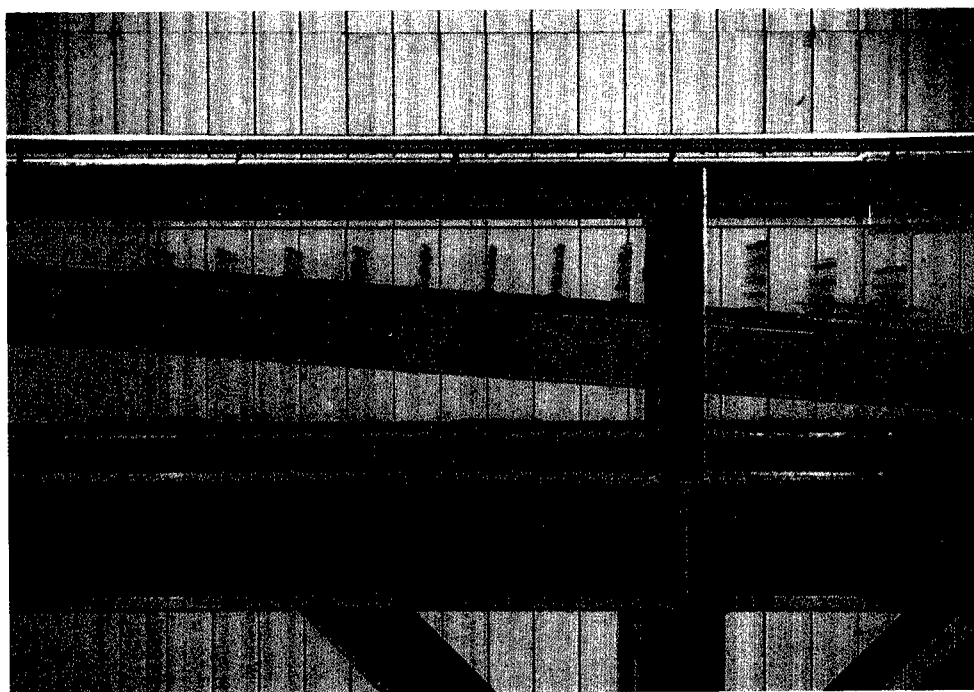
圖一．儀器感應體積大小對測量結果之影響
(原圖見Batchelor 1976)。



圖二．平均壓力 $\bar{p}$ 在有和無懸浮沙粒及亂流情況下可能的變化，
箭頭表由此種壓力分佈所引發的平均流方向。



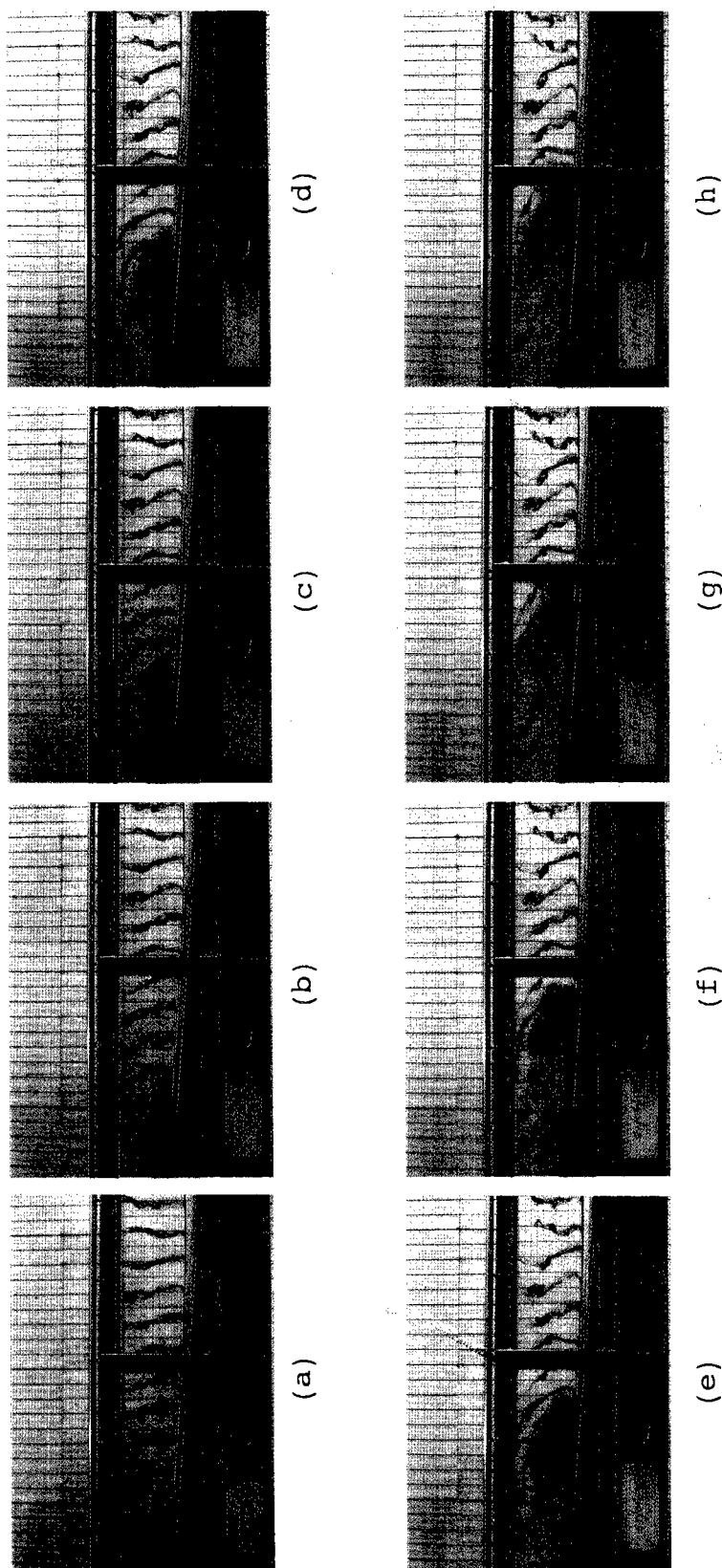
圖三．實驗設備略圖，詳細說明見文章內。



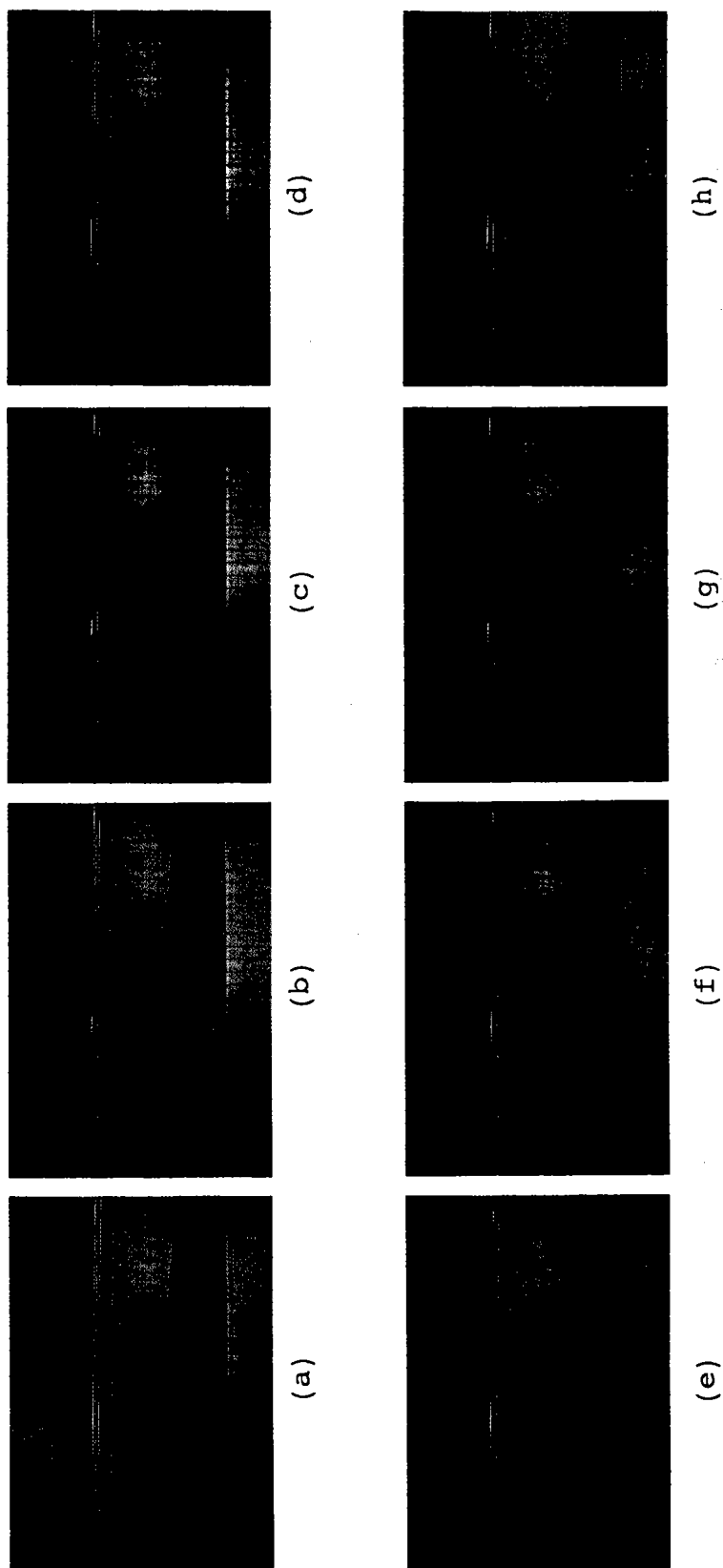
圖四．柵欄配置狀況實景，水槽上緣的標尺，每一小格約為1公分。



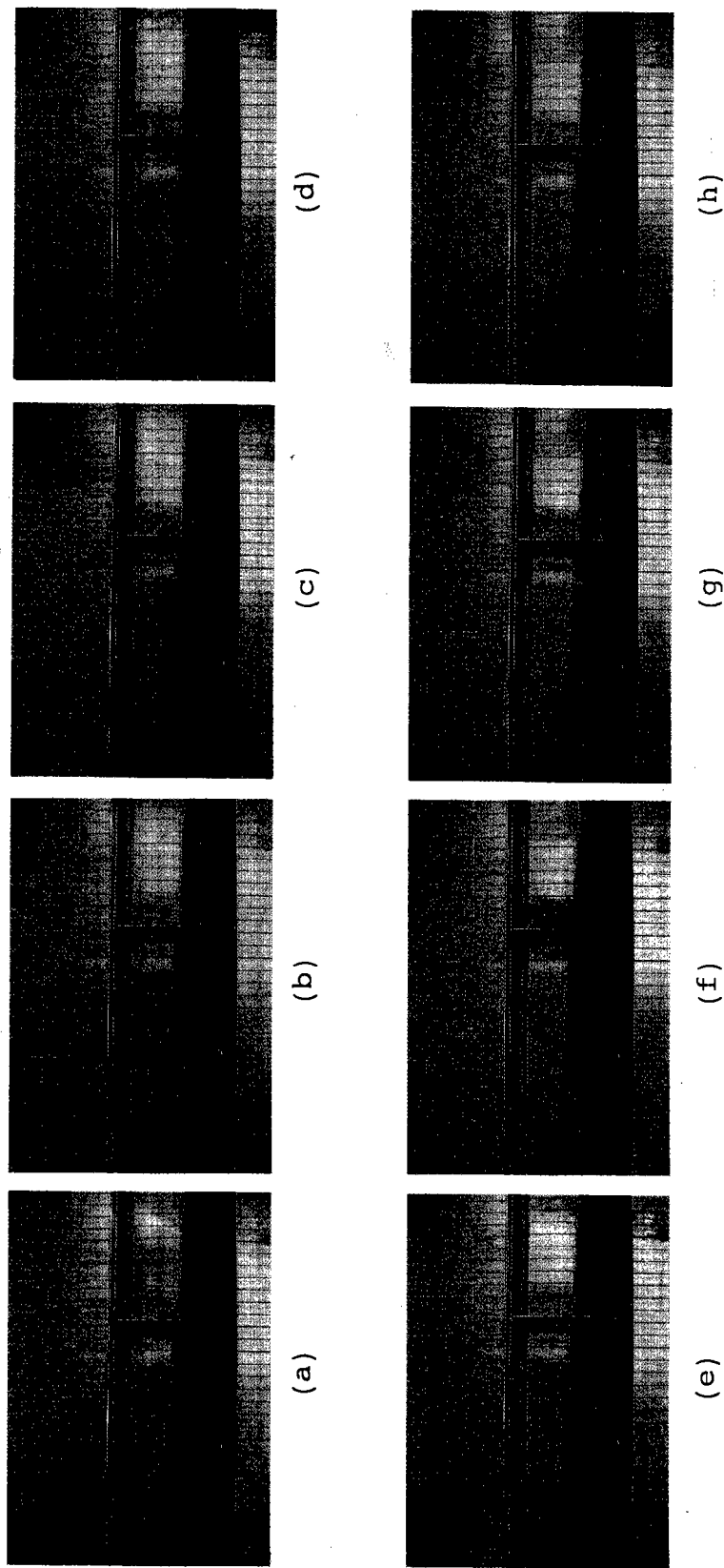
圖五．使用高嶺土做為沙的代替品，實驗中使用一種腳墊(即相片中綠色部份)做為振動板上的粗糙面，此粗糙面雖能有效地激起高嶺土，但後者在離開擾動區後大部份仍處於懸浮的狀態。



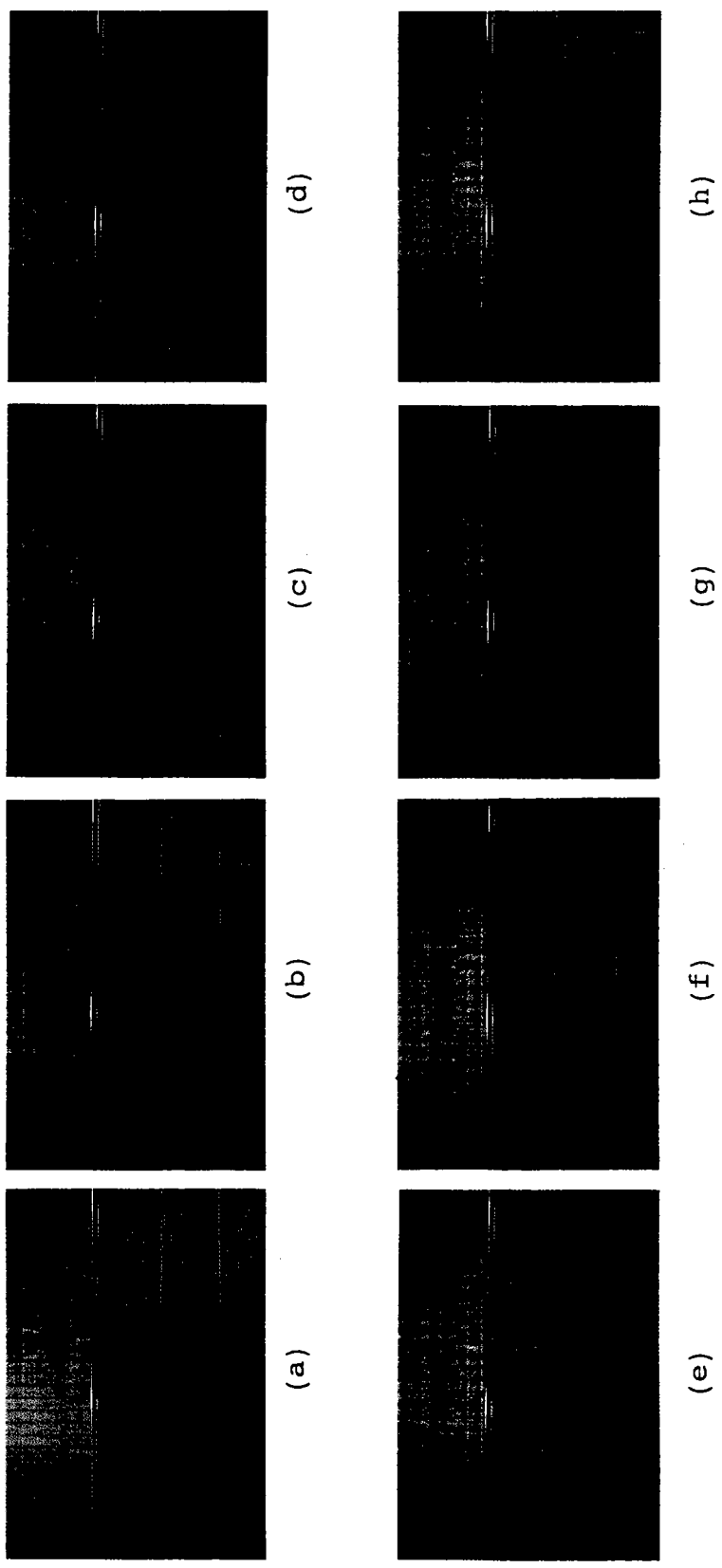
圖六．沙傾倒在一光滑但做往復運動的斜坡上所產生的變化，此組相片顯示在沙抵達處，染料才發生顯著的變化，（振動頻率 $\omega = 62.8 \text{ rad/s}$ ，振幅 $a = 1.45 \text{ cm}$ ）。



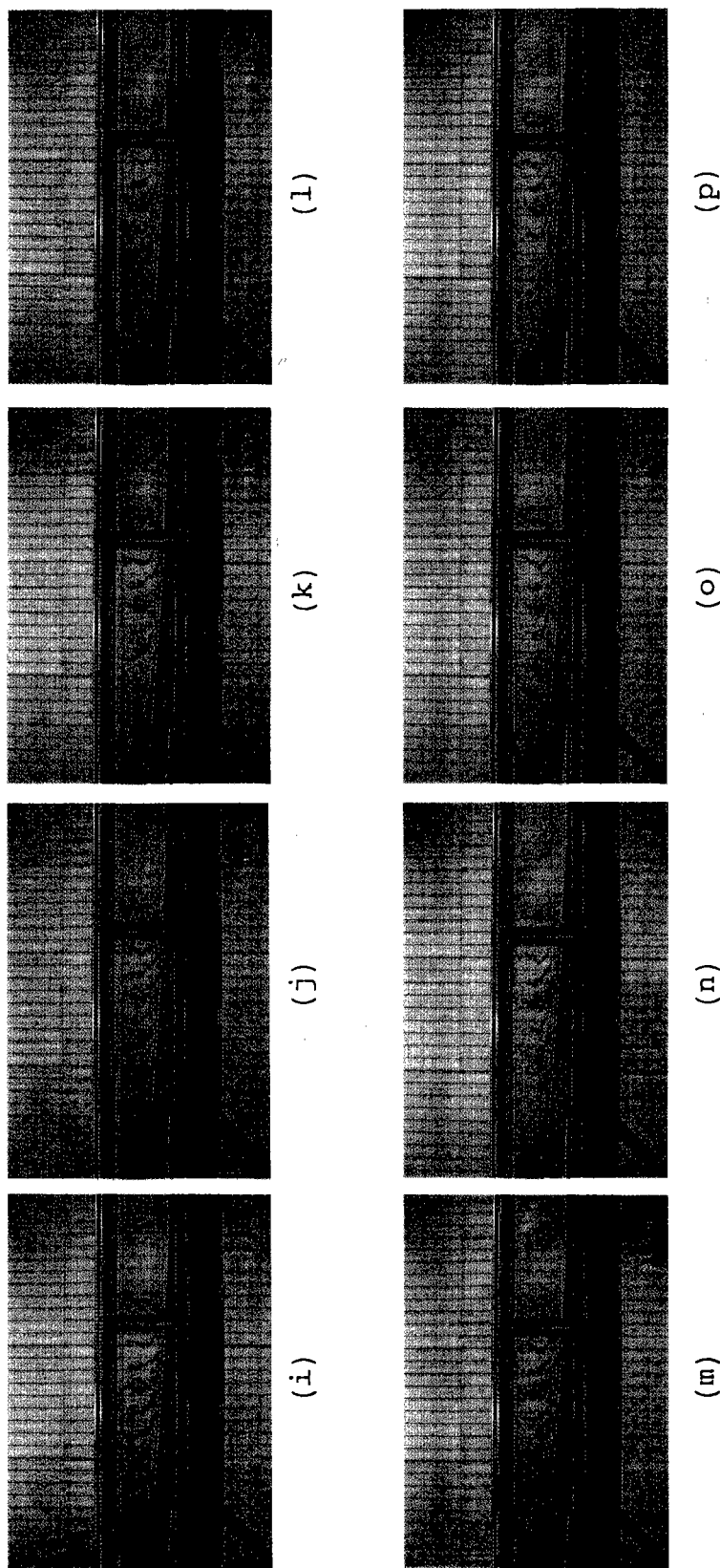
圖七. 當不加沙僅振動板做往復運動時, 第一條染料形成一橢圓形的軌跡, 顯示振動板前有一旋渦存在, ($\omega = 62.8 \text{ rad/s}$, $a = 1.35 \text{ cm}$)。



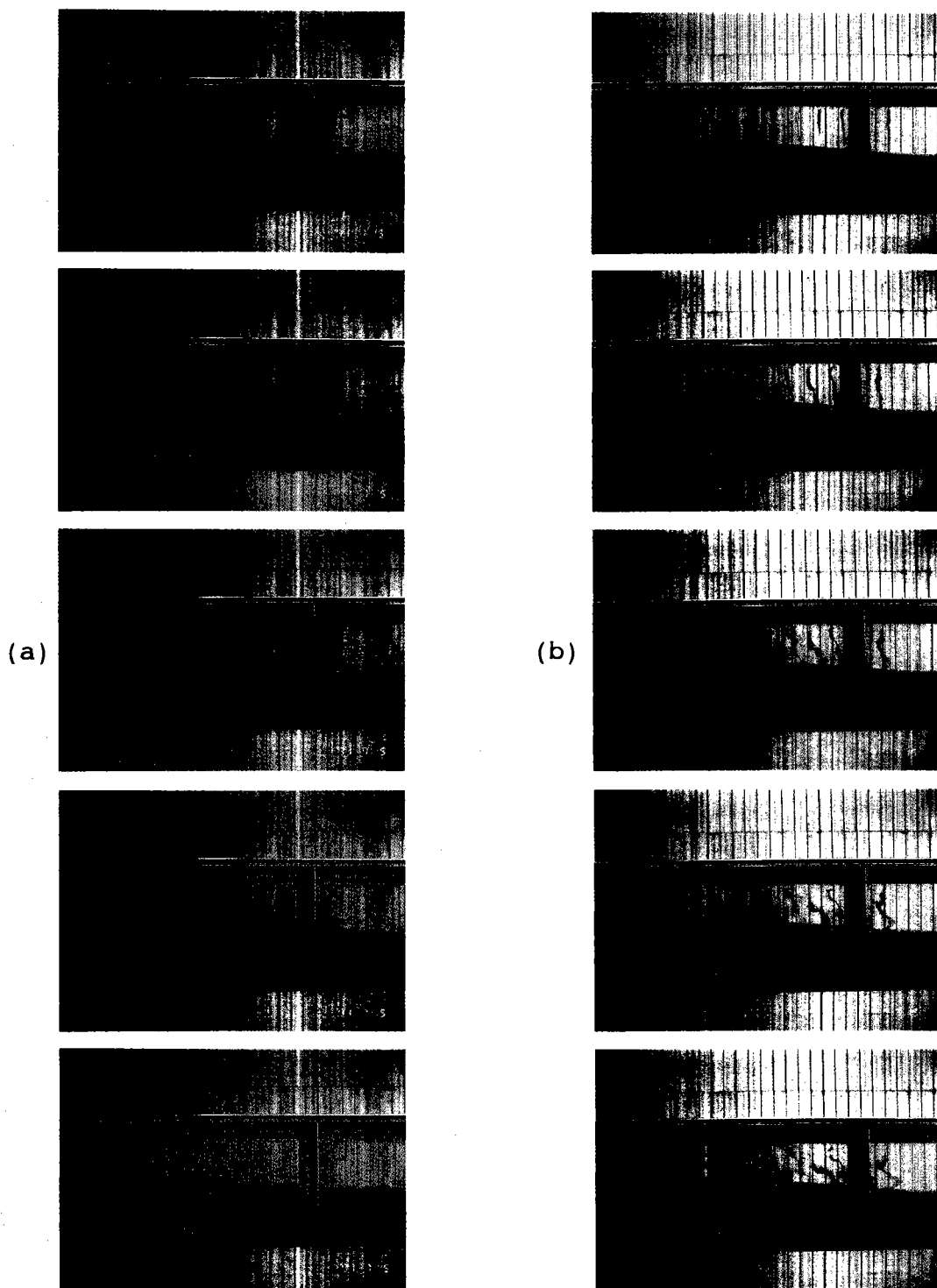
圖八．當亂流區內有沙懸浮時染料的變化，由後幾條染料可看出，離亂流區較遠處幾乎沒有流存在，
 ($\omega = 62.8 \text{ rad/s}$, $a = 1.45 \text{ cm}$)。



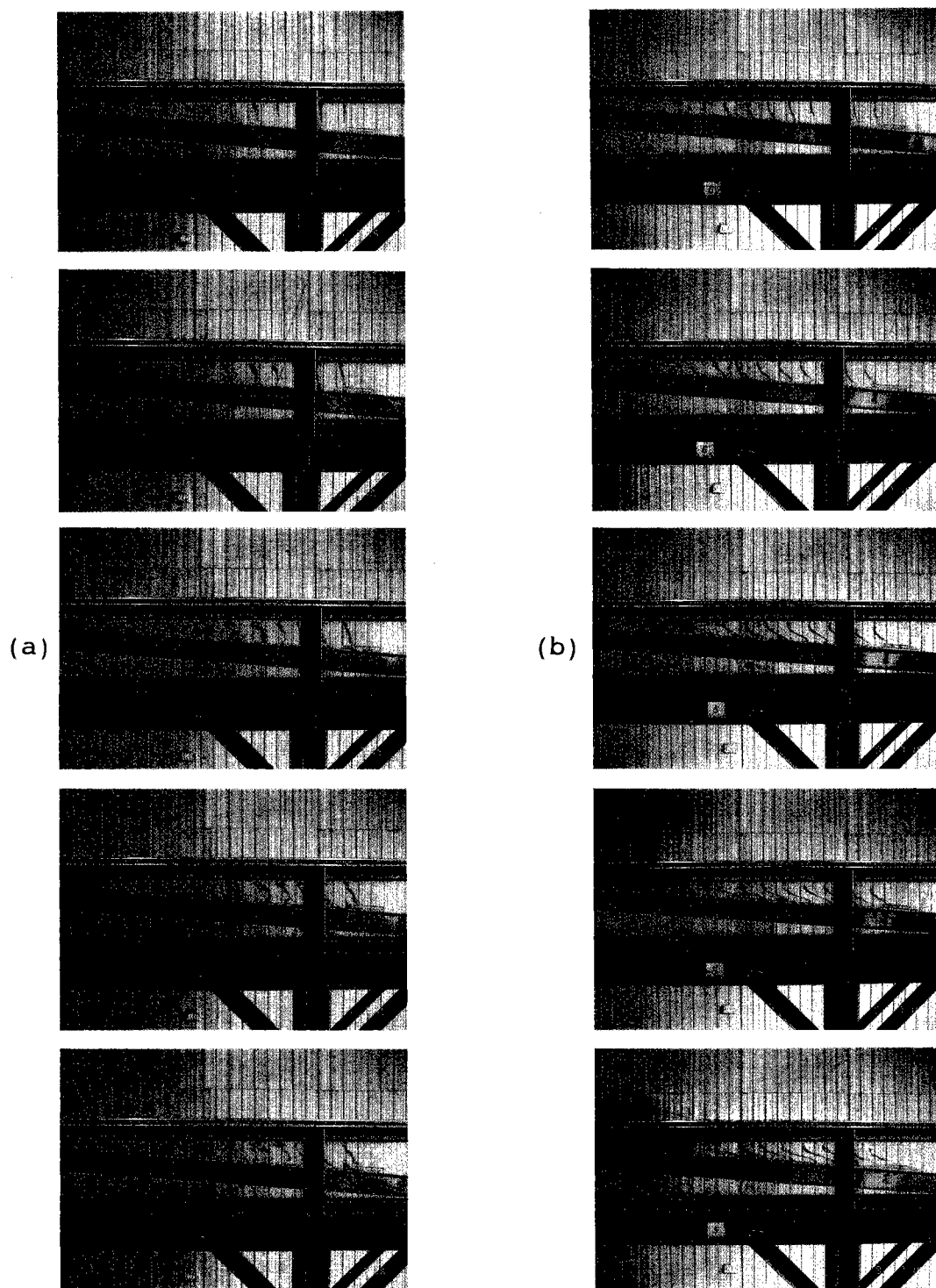
圖九(a-h). 說明見下一頁。



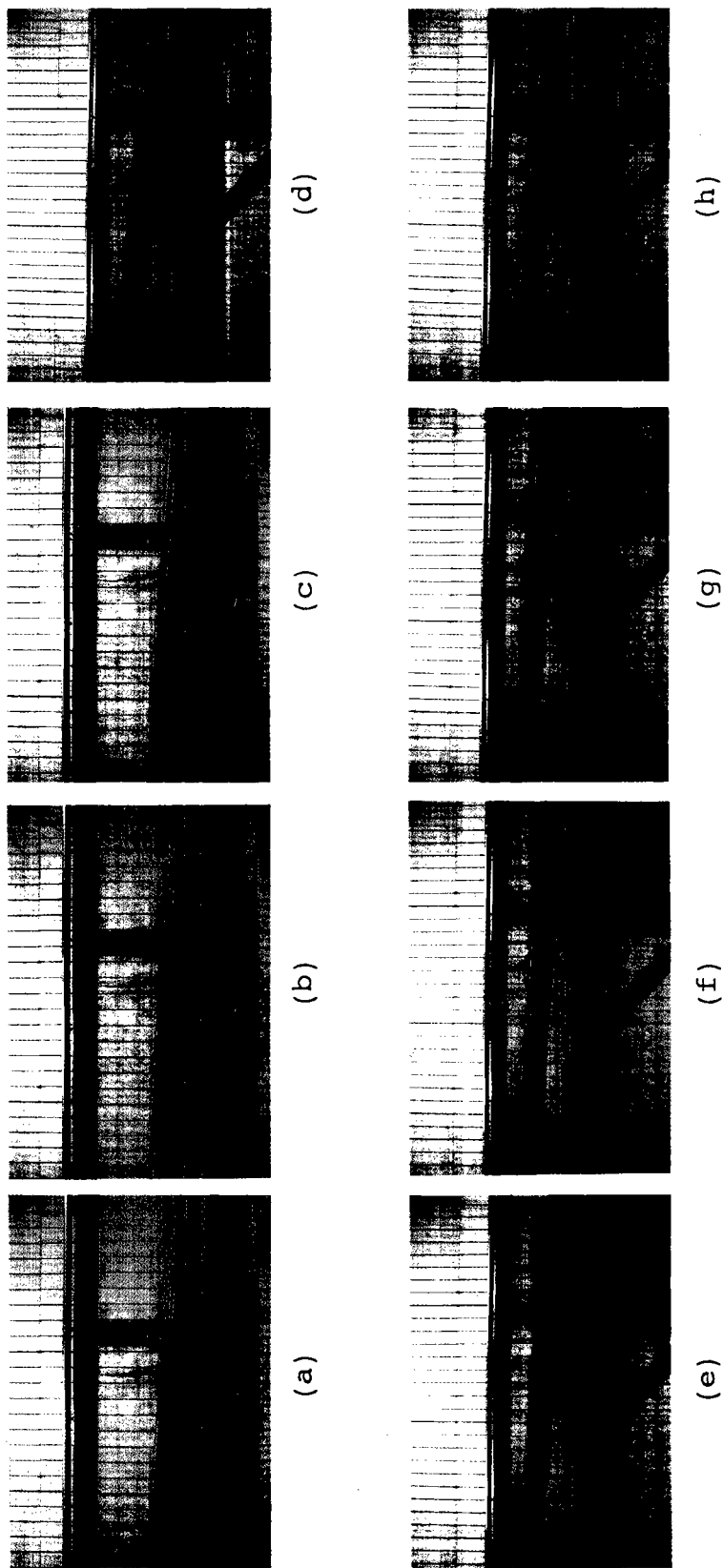
圖九．與圖八類似，但本實驗放的沙較多，且所有染料呈現一種明顯且規則的變化，顯示有一大尺度環流存在，($\omega=62.8 \text{ rad/s}$, $a=1.35 \text{ cm}$)。



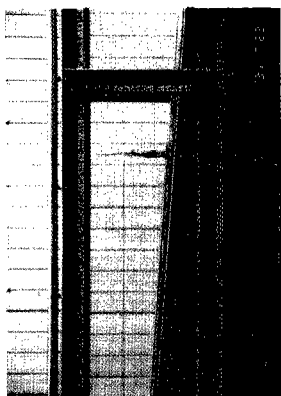
圖十．在同一天不同時間裏所做兩次不加沙且不振動的實驗，(a)實驗是在下午3點12分執行，無大尺度環流出現，(b)實驗是在上午10點44分執行，顯示有大尺度環流出現。



圖十一．與圖十類似，僅振動板這回有振動以產生亂流區，(a)和(b)兩組相片仍顯示不同的結果，($\omega=61.8 \text{ rad/s}$, $a=1.35 \text{ cm}$)。



圖十二．在水溫和室溫保持平衡下所做的不加沙實驗，前三張相片是在實驗前所拍攝，顯示無溫度流存在，其餘相片顯示在振動板啟動後亦無大尺度環流出現，($\omega=61.8 \text{ rad/s}$, $a=13.5 \text{ cm}$)



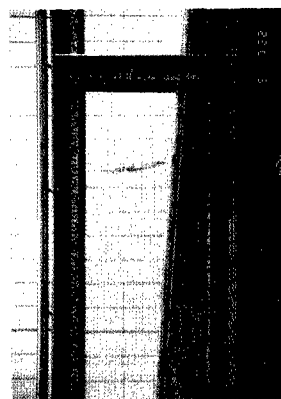
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

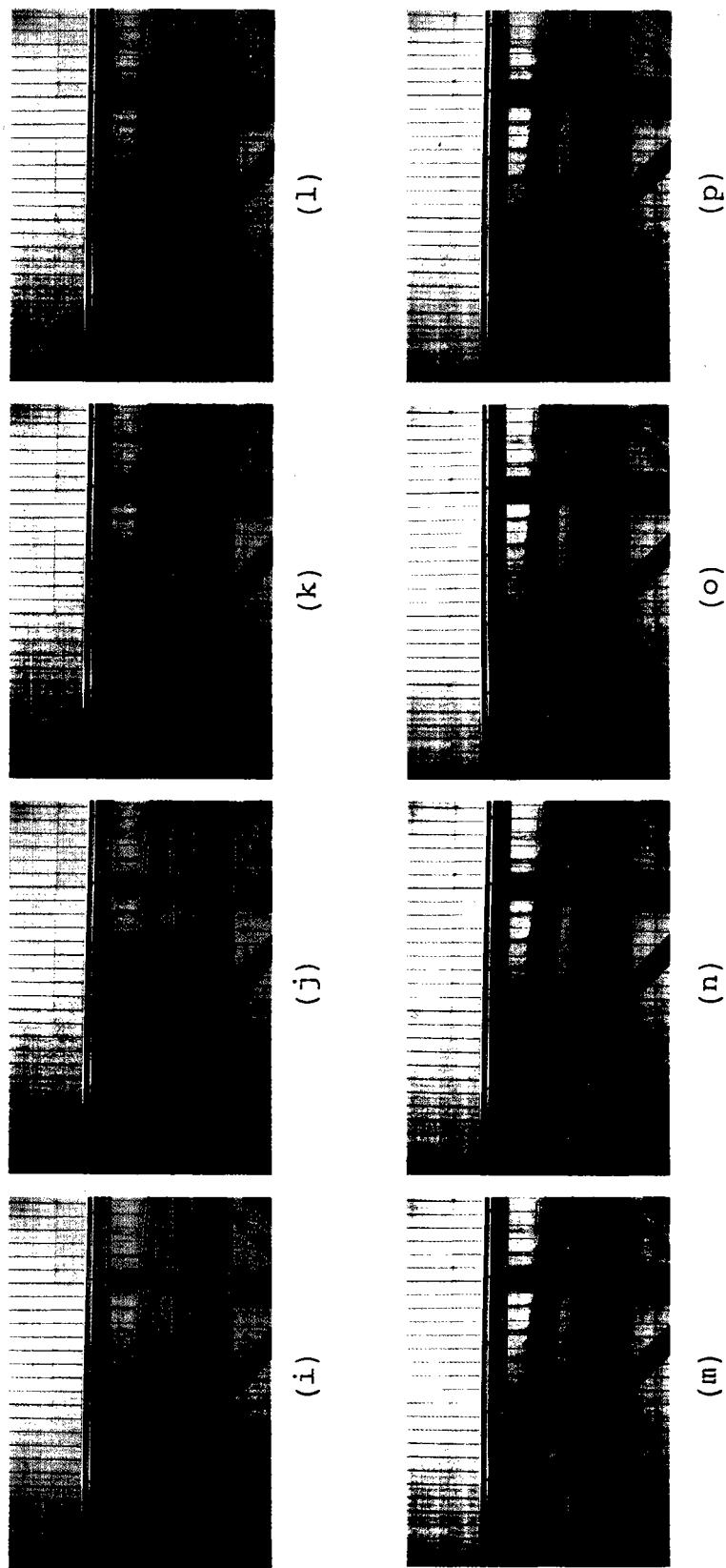


(g)



(h)

圖十三. (a-h) 說明見下一頁。



圖十三．在水溫 and 室溫保持平衡下所做的有放沙實驗，當舖好沙以後，立即用染料測試，得到(a)的結果，兩小時以後再試，則染料已如(b),(c)和(d)般不動，接下來即進行正式的實驗，其結果如其餘相片所顯示者，($\omega = 61.8 \text{ rad/s}$, $a = 1.35 \text{ cm}$)。