

声波在海底的折射

R. E. Christensen W. H. Geddes

美国海军海洋局 华盛顿 哥伦比亚区

摘要 低频声能传播的主要模式是很浅地穿过海底未固结沉积物的折射路径。成功地以海底折射模式来模拟传播需要沉积物厚度、声速和在沉积物中声衰减的知识。未固结沉积物可看作为水柱在海洋的声海底上的延伸,而这种海底就是未固结沉积物的基底。本文讨论了太平洋二个站位上所观测到的不同沉积物厚度的海底损失的结果。沉积物厚的站位在小掠射角时记下的海底损失较小,这是因为附加接收到经线的海底折射而来的声能。另一方面,沉积物薄的站位在大掠射角时记下的海底损失较小,这是因为附加接收到出现在未固结沉积物基底上的次海底(Subbottom)反射的声能。

引言

发展低频声传播模型对海底需要比高频声传播模型更复杂的物理概念。海底沉积物中高频声能的衰减使它不能在沉积物中远距离传播。然而低频声能既会在海底边界(次海底)上反射又可通过沉积物折射。为了研究沉积物对声传播结果的影响,美国海军海洋局进行了实验。

Hill 首先叙述了关于声能通过海底沉积物的折射(1952),此后地球物理学家使用海底折射到达的声能作为估计海底沉积物声速特性的工具。近来当更侧重注意了远距离传播时,声学家研究了经海底折射而传来的声能对低频传播损失的影响 (Morris, 1970; Hama, 1973; Christensen, Geddes 和 Frank, 1975;)。

我们最近的一些工作表明,相当多的低频声能是由很浅地穿过海底未固结沉积物的海底折射路径接收到的。为了试图检验这个假设,在太平洋东北不同沉积物厚度的各个区域进行了海底损失的观测。本文将讨论这些观测的结果以及低频海底损失和沉积物厚度之间的关系。

资料收集和处理技术

用二艘船定量测量了作为掠射角函数的海底损失和作为水平距离函数的总的传播损失。美国海军海洋局 BENT 号作为接收船, AGOR 级船作为发射船。接收船静止,发射船沿一指定的发射方向航行,按选定的间隔投下大约 50 发 MK61 水声信号弹,航行的水平距离大约为 30 哩(图 1)。海底返回的信号由(从接收船吊放的)水听器接收,放大并宽带记录在磁带记录器上。水听器由佛罗里达州奥伦多水声标准分部 (USRD) 校准。为了校准声系统的其余

部分, 还加一内部校准, 产生一已知电压通过该系统。在站位上进行测量时测出声速剖面以精确地确定由于水中射线折射而耗散的声能。用船对船的无线电测距系统测量船之间的水平距离。其他必要信息包括测深和次海底剖面都由发射船沿着发射航迹而测得。

磁带在实验室回放, 数据利用美国海军海洋局的付利叶声学测量和分析系统 (FAMAS) 进行处理 (Hansen, 1975)。这个系统的主要部分是 Hewlett-Packard 5451 付利叶分析器。利用总能量处理技术计算海底损失数据:

$$BL = SL - RL - PL - 6$$

这里 BL = 海底损失, 分贝,

SL = 声源级, 分贝, 相对于 1 码处 1 尔格秒/厘米²,

RL = 接收级, 分贝, 相对于 1 尔格秒/厘米²

PL = 水中的传播损失, 分贝, 相对于 1 码,

除了海底路径以外, 也接收到经过海面路径的声能。因为所有四条路径的信号相加, 所以在上述关系式中需要 6 分贝的修正。为了检验接收系统单独地测量声源级 (SL) 并和过去值 (Christian, 1967; Gaspin 和 Schuler, 1971) 相比较。由水听器的灵敏度级、增益级和所记录的海底反射级代数相加算出给定频率的接收级 (RL)。根据计算程序求得传播损失项 (PL)。海底损失计算程序的输入包括有声源级、各种接收级、声源深度、接收深度、水深、水平距离和作为水深函数的声速值。计算程序的输出是海底损失对掠射角的数值表和频率从 63 赫到 3150 赫标准 1/3 倍频程的总的传播损失随水平距离的数值表。程序也提供上述信息所制的图表。每个站位的海底损失和传播损失值贮存在主机的数字磁带上。

分 析 程 序

在我们以前的一些工作中 (Christensen, Frank 和 Geddes, 1975) 有一种到达的波出现在较低的频率上 (20 到 200 赫), 不出现于高频 (2000 到 20000 赫)。把海底未固结的沉积物当作流体, 把沉积物声速当作水层声速的延伸以后我们推断应该存在如图 2 所示的二条基本海底路径。所有频率上的能量都将经由声源 S 通过 (A) 海底反射路径而在 R 点上接收到。另外, 可以预测低频声能还可经过 (B) 海底折射而接收到。高频声能不可能经过 (B) 海底折射路径, 因为高频声能在沉积物内有很强的衰减 (Hamilton, 1972)。

而且, 我们发现海底折射路径随着声源和接收器之间的水平距离的增加 (掠射角减小) 而迅速变短。这就使得大约距离在 16 千码或 25° 掠射角时传播损失 (海底损失) 很快地减小。

为了进一步研究由海底折射而传来的声的影响, 根据未固结沉积层的厚度选择二个站位。开始选择的一些站位是根据 Lamont-Doherty 地质观测所早年作的沉积物厚度的研究 (Ewing, 1968)。根据沿爆炸波传播方向所取得的地震剖面或者在站位附近所取得的地震剖面来仔细地估计沉积物的厚度。为了尽量减少深度的影响, 选取具有同样海底粗糙性的站位。让这些站位选在同样沉积物的区域内, 从而可以不计因沉积物种类不同而引起的海底损失的差异。在每个站位附近取得活塞型的岩芯并进行分析。这些岩芯和地震剖面用来连接 JOIDES 计划得到的长岩芯 (McManus 等, 1970)。对于站位 A, 所选的站位到 JOIDES 采芯洞之间的距离在 100 哩之内, 而对站位 B 在 170 哩之内。发现所有位置的沉积物都是由粘土和很少带有或不带有淤泥样或沙样物质的软泥所组成。

结果和讨论

两个站位, 站位A和站位B的结果示于图3到图7。沿每一传播方向的深度剖面和次海底剖面示于图3和图5。只画了称为“基底”的次海底。这里所定义的基底可解释为未固结沉积层的底。所有深度由水面算起, 而沉积物的声速为每秒4800呎。

每一站位的深度剖面和次海底剖面图下面示有表明海底损失是掠射角的函数的曲线图。我们选用80赫(1/3倍频程带宽)的海底损失数据是因为从63赫到315赫的低频数据中80赫具有代表性。选自站位A和B的低频(200—3000赫)波形图分别示于图4和图6。图7给出了所有频率的总的海底损失结果, 图上画出了掠射角在 90° — 20° 范围和 20° — 0° 范围的平均值。图3到图7的讨论于下:

站位A

站位A靠近深海扇的向海缘。在传播起始附近沉积物大约厚1000呎, 水平距离为45000码处的沉积物大约厚650呎(图3a)。每次传播的反射点(一半水平距离)下的沉积物的平均厚度大约等于900呎。在离开投弹点45哩处所得到的8呎长的岩芯的沉积物是由粘土和充塞粉砂的粘土(颗粒的平均尺寸从0.0009到0.0015毫米, 孔隙率为78%)所组成。鉴别出离站位A大约100哩的1000呎的JOIDES岩芯的沉积物是硅化石的软泥和泥浆。

接近垂直入射时80赫的海底损失值是8分贝(图3b), 而掠射角为 21° 时增加到11.5分贝。掠射角为 20° 时记下的海底损失明显地减小, 海底损失值跌到2.8分贝, 20° 到 5° 海底损失值继续减小到大约0分贝。所观察到的海底损失很快地减少了大约9分贝, 相当于以前已注意到的经浅海折射而到达的波(Christensen, Frank和Geddes, 1975)。为了找出海底折射而来的波, 使用一低频宽带滤波器(20赫到300赫)重新处理站位A从海底返回的信号。掠射角小于 20° 时鉴别出折射到达的波(图4)。水—沉积物界面的反射用字母“A”标出, 这用高频波形来测定(未示出)。象从低频波形图上所能看到的那样(图4), 接收到来自水—沉积物界面反射的能量很少, 而接收到来自海底折射到达的能量很多(用字母“B”标出)。随后大幅度的波形来自海底折射波的海面的反射(即 17.2° 时大约200和300毫秒)。

站位B

站位B在太平洋上东北的广阔的深海丘陵处。沿着传播方向的反射点分布(0.5到2.5千码)的沉积物厚度是比较均匀的, 平均大约250呎左右(图5a)。遗憾的是, 最靠近的活塞型岩芯离站位B大约450哩, 然而, 岩芯是来自深海丘陵范围的, 大体上代表着沉积物的声学特性。沉积物是由72%孔隙率的充塞粉砂的粘土所组成。沿8呎长岩芯测得的沉积物的平均声速为4938呎/秒, 或比海底水的声速小148呎/秒。离开站位170哩处JOIDES岩芯的沉积物是由在110呎遇到玄武岩(基底)的褐色粘土所组成。

掠射角在 90° 到 40° 范围内, 80赫的海底损失大约平均为7分贝(图5b), 掠射角在 40° 到 10° 范围内大约为5分贝。掠射角小于 10° 时发现海底损失值增加。和站位A相比(图3b), 在站位A, 掠射角小于 20° 时所记录到的海底损失的突然减小, 不出现在站位B的结果中。这表明在站位B*的海底反射的记录中不存在经线的海底折射而到达的波。来自宽带滤波器的低频波形记录(20到300赫)表明任何海底返回的波中确实没有折射到达的迹象。

* 原文为A, 恐系刊误。(译者)

但是,还应注意到从 90° 到 20° , 站位 B 的总海底损失值(图 5b) 比站位 A 在同样掠射角范围内的海底损失值显著地小得多。最大的差别大约在 50° 到 20° 范围内, 站位 B 的海底损失值比站位 A 的海底损失值平均小 5.5 分贝。站位 B 的未固结沉积物是比较薄的, 较大掠射角时很多能量显然是从底层岩石反射来的。检查低频记录(20—300 赫) 所表明情况正是这样。如图 6 所示, 87.2° 时所得到的波形记录的主要到达的波不是来自水—沉积物界面, 而是出现在 80 毫秒以后的次海底反射。这个传播时间的差对应于沉积物表面和基底之间的时间差, 这个基底从地震记录中可以辨认出来(图 5a**)。另一方面, 象站位 A 那样沉积物比较厚的区域, 基底作为次海底反射体反射较多能量来看太深。结果, 反射主要出现在水—沉积物界面上或界面附近。由于沉积物有很低的声速, 所以接近透射角附近有很大损失在预想之中(Kinsler 和 Frey, 1963)。这或许是对 50° 到 20° 范围内观察到稍大的海底损失的解释(图 3b)。然而, 象前面已注意过那样, 海底损失变到很大以后, 掠射角小于 20° 时, 来自海底折射而接收到的低频波。

海底损失对频率的关系

为了比较二个站位从 63 赫到 3150 赫的结果, 将海底损失值在二个掠射角范围内进行平均。 90° 到 20° 的平均值示于图 7a; 而 20° 到 0° 的平均值示于图 7b。

从图 7a 注意到站位 A 的频率关系很小(沉积层厚)。而对站位 B(沉积层薄) 发现从 3150 赫到 315 赫每倍频程增加 2 分贝, 频率在 315 赫到 63 赫没有发现频率关系。站位 A 的标准偏差比站位 B 的大, 这意味着站位 A 具有较大的掠射角关系。这和我们在 80 赫时发现的是一致的(比较图 3b 和 5b)。在较高频率(500 赫到 3150 赫) 甚至发现更大的变化, 这是因为在站位 A 的海底损失结果中透射角具有较大的影响。

在大的和中等的掠射角范围内(图 7a) 高频时站位 B 的平均损失比站位 A 的稍大, 但是在较低频率上损失显著地小得多。平均值的最大差出现在 63 赫到 500 赫之间, 站位 B 的平均结果大约比站位 A 低 4 分贝。象在 80 赫时讨论中所注意到的那样, 掠射角为 90° 到 20° 范围的低频损失的减小是因为接收到基底岩石中次海底折射而来的能量。

站位 B 上 0° 到 20° 掠射角范围的平均海底损失随频率以每倍频程 1.5 分贝的斜率减小(图 7b)。另一方面, 站位 A 在 1000 到 3150 赫之间出现弱的频率关系, 但是在 1000 赫到 250 赫之间海底损失很快减小(差不多每倍频程 4 分贝。低于 250 赫站位 A 的斜率减小到大约每倍频程 1.5 分贝。

频率低于 1250 赫在 20° 到 0° 掠射角范围内(图 7b) 观察到和 90° 到 20° 掠射角范围(图 7a) 相反的结果; 那就是站位 A 的海底损失值比站位 B 的海底损失值小。而且最大差值出现在低频, 范围从 63 赫时的 5 分贝到 315 赫时的 3 分贝。较小掠射角时低频海底损失的减小是因为接收到来自通过站位 A 比较厚的沉积层浅的折射路径的附加能量。

简 要 结 论

在比较厚的未固结沉积物区域($\cong 900$ 呎厚) 低频、小掠射角时返回声能的主要机理是来自通过沉积层的折射。例如, 80 赫时掠射角为 20° 到 0° 的海底损失值平均比掠射角为 20° 到

* 原文(图 5b) 应是(图 5a)。(译者)

** 原文为(图 5b) 应是(图 8b) (译者)

50°时的海底损失低 10 分贝。在 63 赫到 315 赫频率范围观察到海底折射影响最占优势。

在比较薄的未固结沉积层区域($\cong 350$ 呎厚) 对所有频率和掠射角返回声能的主要机理是来自海底和次海底的反射。而且, 许多能量似乎是从基层岩石中经过次海底上反射返回的。在低频、大掠射角时这是非常明显的。还有在薄的沉积层区域没有观察到海底折射而到达的波的影响, 63 赫到 3150 赫的整个频谱内事实上没有掠射角关系。

把薄沉积物站位的低频声的结果和厚沉积物站位的结果相比较表明: (1) 在大的和中等的掠射角范围海底损失比较小。(2) 在小的掠射角范围海底损失比较大。例如, 频率从 63 赫到 500 赫, 掠射角为 90° 到 20° 沉积物薄的站位的海底损失平均比沉积物厚的站位低 4 分贝, 而频率从 63 赫到 315 赫、掠射角为 20° 到 0° 沉积物薄的站位的海底损失平均比沉积物厚的站位大 3 到 5 分贝。在较大掠射角时观察到比较小的海底损失是因为接收到来自基底岩石的次海底反射的附加低频能量。在较小掠射角时(和厚的沉积物区域相比较)观察到较大的海底损失是因为接收不到经过沉积层的浅海折射而到达的能量。结论是沉积层厚度提供不了维持海底折射路径的声速余量(来自沉积物内的声速梯度)。在所研究的区域中沉积层的截止厚度在 250 呎到 900 呎之间, 或者更确切地说从水—沉积物界面到达未固结沉积物底的来回时间在 0.1 到 0.37 秒之间。

为了在低频海底损失结果和沉积物厚度之间进一步建立广泛的关系需要更多的工作。更为复杂的统计分析尚需要进一步的声学资料从而可以更进一步看清问题。无疑更多的关于沉积物厚度、沉积物声速和通过沉积物声能的衰减的信息是必要的。

致谢

作者向为帮助测定沉积物厚度的美国海军海洋局的小 Luther 和 Allen Lowrie 先生致谢。

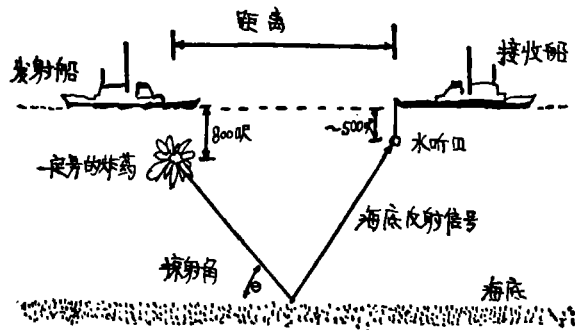


图1. 海上实验示意图

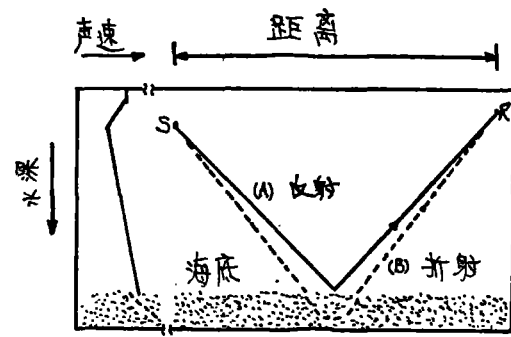
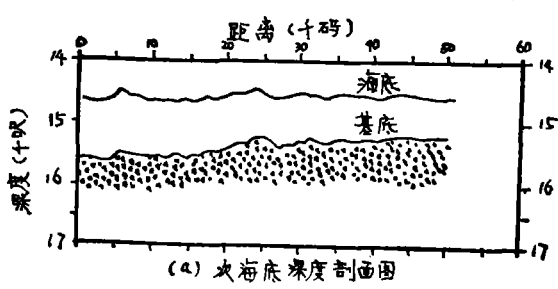


图2. 根据水—沉积物联合声速剖面图示意
(A)海底反射到达(B')海底折射到达



(a) 次海底深度剖面图

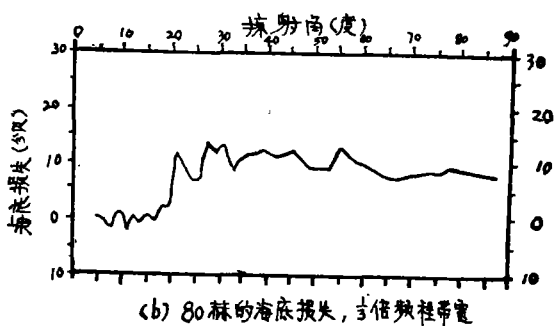


图3. 站位A的声学结果, 注意沿传播方向未固结沉积物的层比较(a)

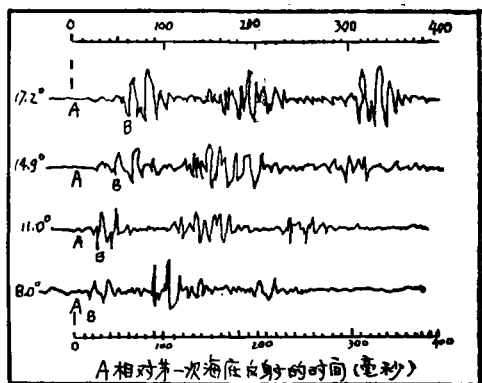


图4. 站住A的四次发射在不同掠射角时低频(20—200赫)示波器波形的复制图用字母“A”表示第一次海底反射到达, 用字母“B”表示海底折射到达。

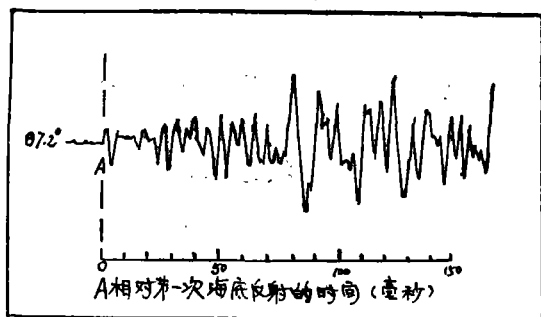
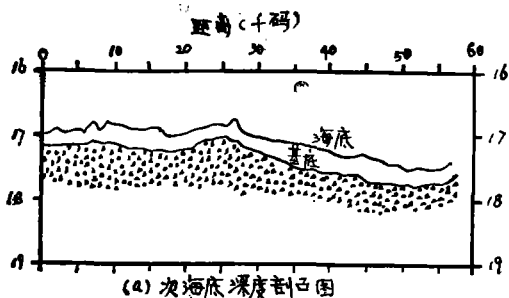
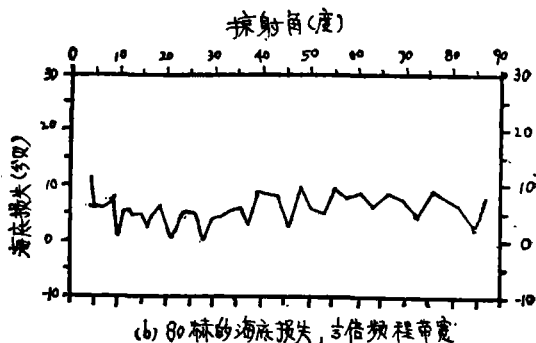


图6. 站住B接近垂直入射时, 低频(20—300赫)示波器波形的复制图, 注意在第一次海底反射到达(用字母“A”表示)以后80毫秒处出现极大值。



(a) 次海底深度剖面图



(b) 80赫的海底损失, 1/3倍频程带宽

图5. 站住B的声学结果, 注意沿传播方向未固结沉积物的层比较薄(a)

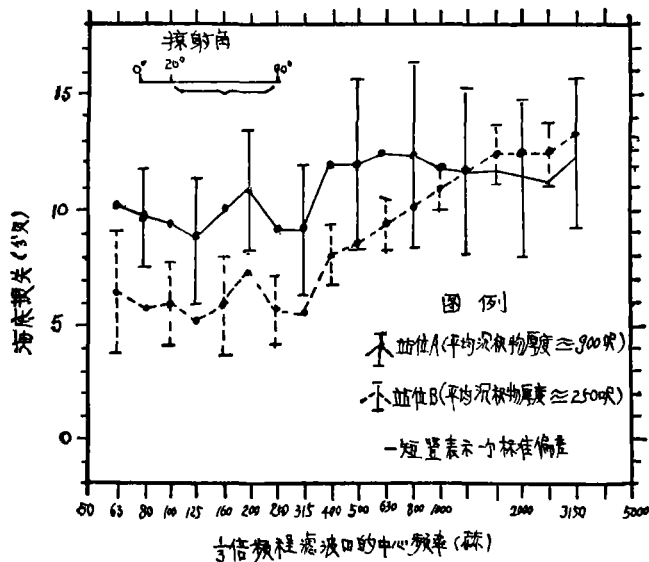
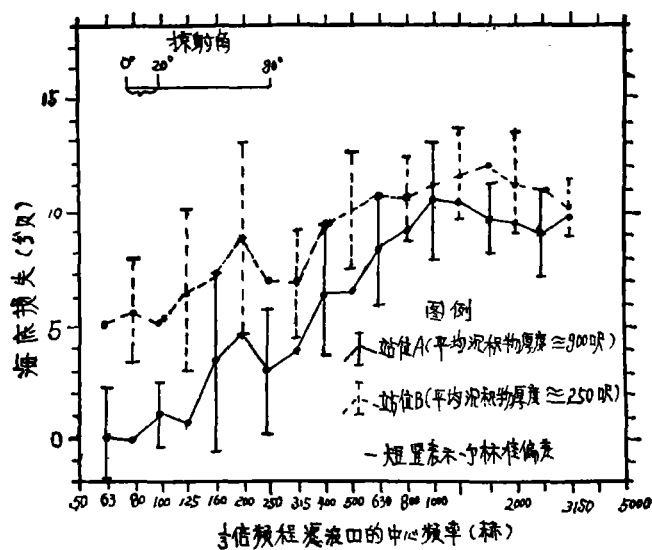


图7. (a) 表示在20°到90°掠射角范围内的平均海底损失的频率变化站住A和B的比较



(b)表示0°到20°掠射角范围内的平均海底损失的频率变化。站点A和B的比较。

译自 SACLANTCFN CP-17

译者 侯温良

校者 冯绍松