

I-58

模型杭に関する実験的研究

北海学園大学工学部	正員	松井義孝
北海学園大学工学部	正員	早川寛志
専修大学道短大	正員	金子孝吉
北海学園大学工学部	正員	当麻庄司

1. はじめに

構造物基礎の中で杭基礎に関しては、「道路橋示方書Ⅳ下部構造編」に弾性体基礎として 林-Chang の水平方向地盤反力係数(k_H)を考慮した設計手法がある。杭の許容水平変位量は基礎の弾性領域の範囲以内として杭径の1%以下($\leq 15\text{mm}$)と制限しているが、実際には制限を超える場合も起こり得る。従来、現場における杭の水平載荷試験法は、杭頭及び載荷点の変位計測をダイヤルゲージ、傾斜計を用いている。杭体に発生する曲げ応力度を測定するためにひずみゲージを杭外周にリード線とともに取り付けに行くが、リードプロテクターの断面積が杭断面積の10~20%にも達し、さらに打ち込み時の破断等も多く、根入れ長の大きい場合には計測不可能なことが多い。本実験では、従来不可能とされていた細い金属管内壁に正確にひずみゲージを貼ることが出来た。土質定数が一般的に知られている豊浦標準砂の土槽にアルミパイプを模型杭とし、杭長は有限長から半無限長の付近で水平方向地盤反力係数(k_H)を深さ方向に測定し、理論式による計算結果との比較を行い考察を加えたものである。

2. 実験装置

模型杭の周囲地盤は豊浦標準砂を乾燥状態で相対密度が50%程度で用い、実験槽は、高さ・幅・奥行きがそれぞれ90×60×120cm(高さ可変)のコンクリート型枠用メタルフォームを緊結して使用した。(写真-1) 載荷方法は奥行き方向の前後に片引き・正負交番載荷ができるように外径0.8mmのステンレス製ストランドワイヤーによって杭の任意の高さに水平載荷出来るように配置され、他端は槽外で滑車を介し、重錘によって載荷し、さらにその下部に杭頭水平変位測定用として1/100mm読みのデジタルダイヤルゲージを設置した。

3. 模型杭

杭材は工作が容易であり、高精度で同一規格のものが手軽に入手可能なアルミパイプ(外径12mm, 肉厚1mm)を用いた。(E=6.8×10⁵kgf/cm², I=5.27×10⁻²cm⁴; 実測値) 今回試作した模型杭は、接着時の加圧に磁石を応用した。管内壁に接着するゲージの背面に細い軟鋼を仮止めし、所定の位置に挿入後接着が終了するまで接着面に2~5kg/cm²の加圧をするために管外に配置したマグネット・コイルに可変直流電源装置から通電する。本実験に使用した模型杭は先端から8cm間隔で管内に7枚のひずみゲージを貼り、それぞれに3枚の温度保証用ダミーゲージ(別のアルミ材に貼って無荷重状態の

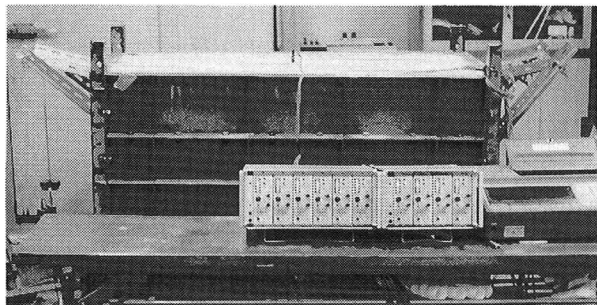


写真-1 実験装置

砂中に置く)と組み合わせてブリッジを構成し、ひずみ増幅器を経由してデータアナライザーに収録・解析する。この杭を空気中で単純梁とし、中央に集中荷重を加えることによって、予め検定済みのヤング係数を用いたたわみ量と曲げモーメントの関係から、各点の係数を算出してひずみ増幅器を校正する。

実験途中のキャリブレーションではきわめて安定している。

4. 実験内容

本実験は以下の3 CASEについてそれぞれ片引き水平載荷試験及び両引き交番水平載荷試験を行った。

CASE 1 根入れ長 $h=48\text{cm}$

CASE 2 根入れ長 $h=60\text{cm}$

CASE 3 根入れ長 $h=75\text{cm}$

5. 実験結果

CASE 2 図-1 は根入れ長 $h=60\text{cm}$ について行ったものであり、荷重の増加にともなって、最初のパターンを大きく変えることなくひずみの増大がみられる。つぎに5kgf 荷重の状態ではフレームにプラスチックハンマー

でわずかに衝撃を与えることによって、ひずみは急激に増大し、あたかも等分布荷重を受けたような放物線状を呈する。これは杭頭の荷重の増加にともなって砂の中に成長したアーチアクションから応力の再配分への移行を示すものであり、水平力を受ける杭の地震時に於ける挙動を示唆するものと思われる。

そこから、1 kgf 毎に除荷するにつれて、杭先端部のひずみを維持しながら地表に近いほうからひずみの減少が見られ、荷重を完全に取り除いた後も杭の先端は周囲の砂による拘束が残る。この段階ではフレームに衝撃を与えても消滅には至らない。これは、ここではもはやフレームと杭の間に強いアーチが存在しないことを意味する。しかし、杭頭にわずかに手をふれると消滅する。

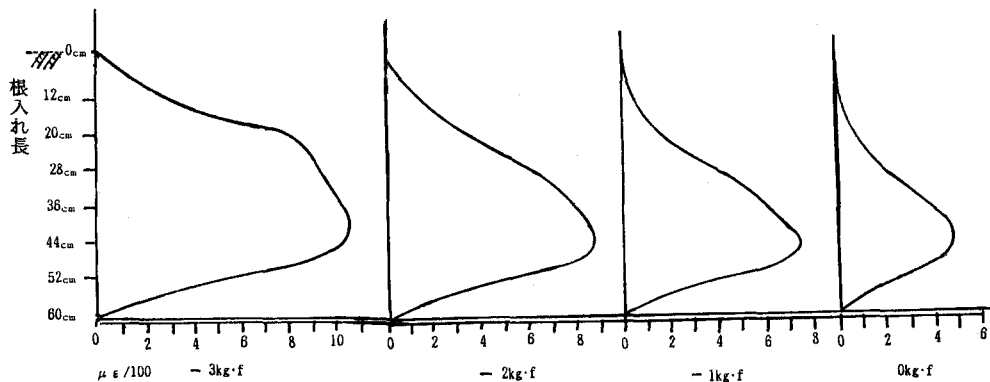
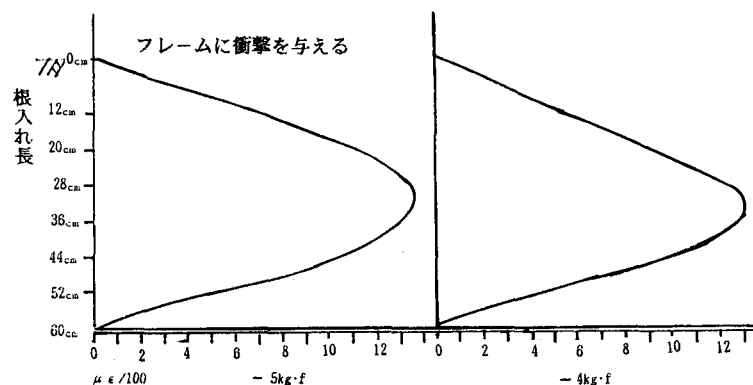
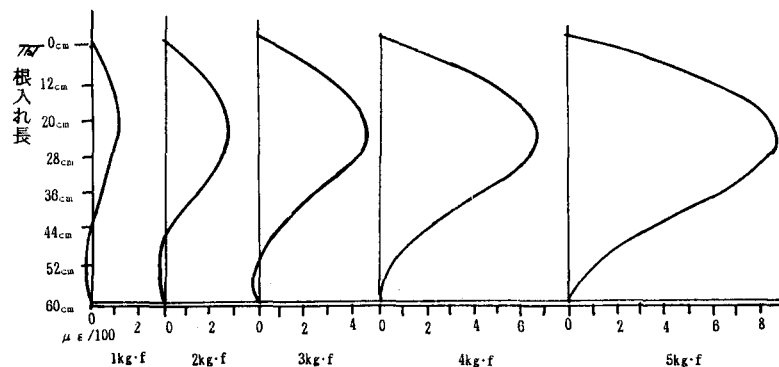


図-1 荷重-変位曲線($h=60\text{cm}$)

CASE 1 図-2は根入れ長が48cmで有限長の場合を示す。

ひずみの増加傾向はCASE 2と同様であるが、最大ひずみの点が荷重の増加とともに杭の先端方向へと移行してゆく傾向が見られ、5kgfではほぼ放物線状のひずみ分布が見られる。

CASE 3 図-3は半無限長の場合に相当する。

杭頭付近のひずみ分布は、図-1、図-2と同様の傾向が見られるが、杭先端付近に注目すると、ひずみのゼロまたはマイナスの部分が、特に低荷重の時に明確に現れており、それが荷重の増加に反比例するかのように杭の先端方向へと移行していく様子がみられる。この部分では杭頭に受けた水平力の負担が極めて小さいことを示しており、今後、水平力のほかに、杭頭モーメント及び、軸力など複合荷重下の実験をおこない、杭の断面低減の位置および板厚の検討へと発展させるよう実験を試みる所存である。

図-4、5、6はそれぞれCASE 1、

CASE 2、及びCASE 3 の各根入れ長にたいして、地震力を想定した交番荷重による急速荷重試験の杭頭変位-荷重曲線である。地中部のひずみ分布のパターンでは何れも縦軸を中心に正・負が非常によい対象形をなしており、土質工学会編：杭の水平荷重試験方法・同解説に掲載されている「水平荷重試験における曲げ応力度測定例」とひじょうに良く類似している。

図-4、5、6の上側に描かれた履歴曲線（杭頭変位-荷重曲線）に注目すると、図-4（CASE 1 根入れ長 $h=48\text{cm}$ ）では、初期の状態から荷重を増すごとにプラス側に傾いて行き、各荷重ごとの頂点を結ぶと円弧状をなしている。ちなみに、逆方向（マイナス側）から -1kgf 、 0 、 $+1\text{kgf}$ 、の順に載荷すると、履歴曲線の包絡線は、縦軸を対象に逆向きの円弧状を形成する。このことは、支持層までの根入れ長の浅い杭にあっては、杭頭に初期に受けた荷重の方向に変位が左右され、交番荷重にもかかわらず、一方的に変位が累積し、極めて復元力に乏しいことを示している。

図-5（CASE 2 根入れ長 $h=60\text{cm}$ ）の杭頭変位履歴曲線では、各荷重ごとの頂点を結ぶ線は、やや直線をなしており、水平荷重ゼロの時の残留変位量についても、荷重ごとに順次配列されているのがみられる。これは、非常によい復元性を示しているといえる。

図-6（CASE 3 根入れ長 $h=75\text{cm}$ ）の杭頭変位履歴曲線では、載荷の初期段階（荷重の小さい領域）ではCASE 2の場合と同様な直線状の復元傾向がみられるが、荷重を増すにつれて、変位量の増加率が大きくなり、

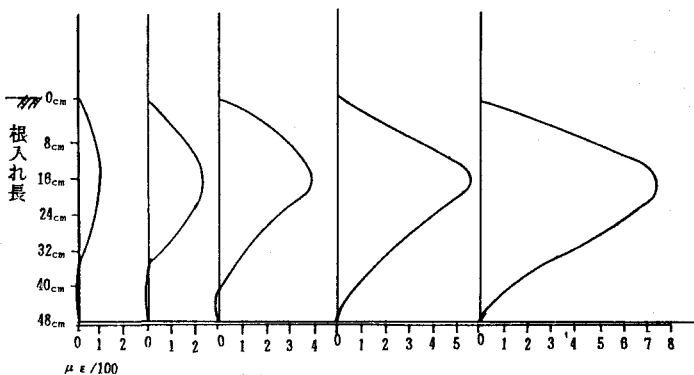


図-2 荷重-変位曲線 ($h=48\text{cm}$)

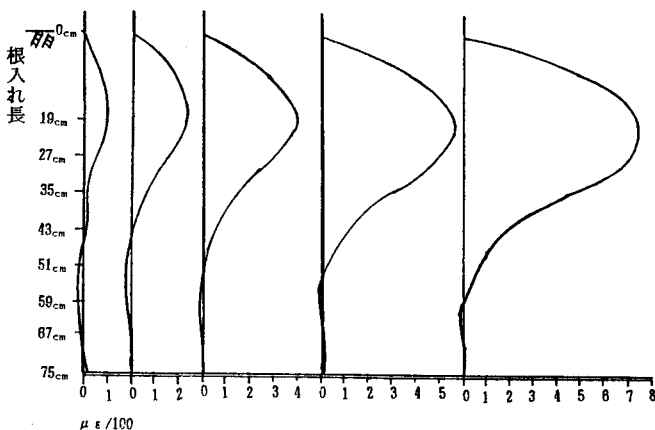


図-3 荷重-変位曲線 ($h=75\text{cm}$)

各荷重ごとの頂点を結ぶ線は、ゆるい反向曲線を描いている。さらに、その下のひずみ分布曲線で、杭頭より45cm付近から杭先にかけて注目すると、ひずみ曲線が、それより頭部側と比較して正・負逆方向に反転しているようすがみられる。これは、支持層までの根入れ長が長いために、杭頭変位の大きい領域では、乾燥標準砂の周囲地盤によって影響を受けることによって、杭頭の挙動が、塑性状態に近いような非線形的挙動を呈しているように見受けられる。

CASE 4、5、6を改めて比較してみると、3者の中で、杭頭に交番水平力载荷だけの条件下ではあるが、最も合理的ともいえる状態が図-5 (CASE 2 $h=60\text{cm}$) の場合であろうと思われる。

周囲の乾燥標準砂の地盤定数や、支持層までの根入れ長、さらに、弾性体としての杭の特性等、種々の条件がつりあって良好なバランスを保っている様子がうかがえる。

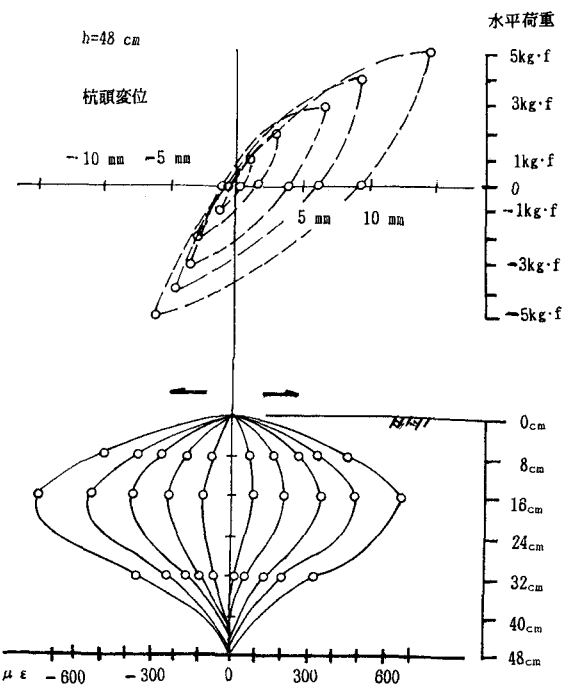


図-4 杭頭変位-荷重曲線($h=48\text{cm}$)

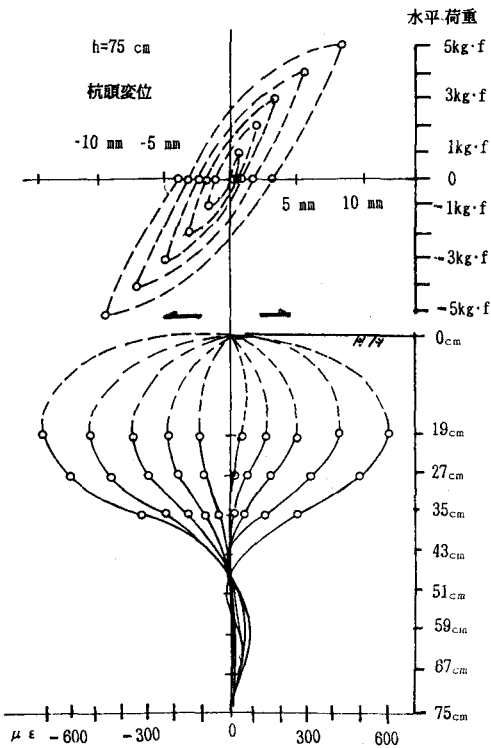


図-6 杭頭変位-荷重曲線($h=75\text{cm}$)

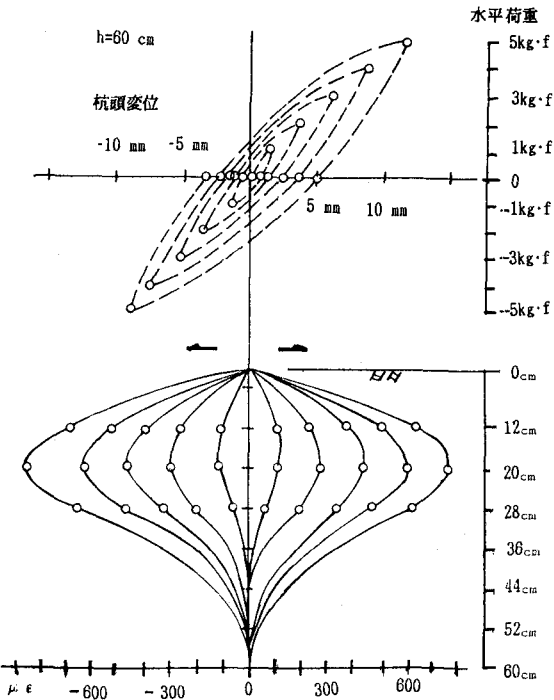
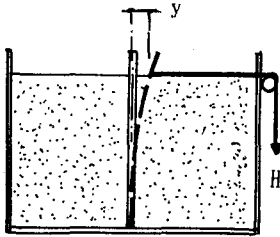


図-5 杭頭変位-荷重曲線($h=60\text{cm}$)

6. 室内実験から求められた水平方向地盤定数

杭基礎の水平抵抗は杭体と地盤との相互作用である。特に地盤の剛性は深さ方向に一様でなく、又多層地盤が多い事や、杭の深さ方向の変位量が変化することから、厳密的には深さ方向の分布を考慮する必要がある。本実験では初期実験として道路橋示方書との整合を計り水平地盤反力係数が深さ方向に一様であると考え下式のとうり、地表面に水平力 H (kg)を載荷し地表面の水平変位量 y (mm)から、水平方向地盤係数 k 値を逆算し求める方法を用いる。



$$y_1 = H_1 / 2EI \beta^3 \quad \dots \quad (\text{式-1})$$

$$\beta_1 = \sqrt[3]{H_1 / 2EI y_1} \quad \dots \quad (\text{式-2})$$

$$= \sqrt[4]{KD / 4EI} \quad \dots \quad (\text{式-3})$$

$$k_{H1} = 1/D \sqrt[3]{4/EI \cdot (H_1/y_1)^4} \quad \dots \quad (\text{式-4})$$

図-7 水平力と変位のモデル

- k_{H1} = 水平方向地盤反力係数 (kg・f/cm³)
 H_1 = 水平力 (kg・f)
 y_1 = 地表面の水平変位 (cm)
 E = 杭の弾性係数 (kg・f/cm²) = 6.80×10^5 (kg・f/cm²)
 I = 杭の断面 2 次モーメント (cm⁴) = 5.27×10^{-2} (cm⁴)
 D = 杭径 (cm) = 1.2 (cm)

表-1 水平方向地盤反力係数(k_H)と基礎の特性値(β)の計算値

杭長 (cm)	水平力 (kg)	地表面の 変位量(mm)	基礎の特性 値 β (cm ⁻¹)	βL	有限長か 半無限長	水平地盤反力 係数(kg/cm ³)	地中部の解析 歪度値($\mu \epsilon$)
CASE1 h=48	1.0	1.08	0.0506	2.42	有限長	0.7801	110
	2.0	2.38	0.0489	2.34	有限長	0.6854	220
	3.0	4.13	0.0466	2.23	有限長	0.5644	340
	4.0	6.79	0.0435	2.08	有限長	0.4269	490
	5.0	10.19	0.0409	1.96	有限長	0.3345	660
CASE2 h=60	1.0	1.95	0.0415	2.49	有限長	0.3548	130
	2.0	3.47	0.0432	2.59	有限長	0.4146	230
	3.0	5.10	0.0435	2.61	有限長	0.4278	370
	4.0	7.06	0.0429	2.57	有限長	0.4053	500
	5.0	9.10	0.0425	2.55	有限長	0.3890	640
CASE3 h=75	1.0	1.40	0.0464	3.47	半無限長	0.5519	110
	2.0	3.13	0.0447	3.35	半無限長	0.4758	240
	3.0	5.24	0.0431	3.23	半無限長	0.4109	380
	4.0	8.01	0.0411	3.09	半無限長	0.3425	530
	5.0	11.21	0.0396	2.97	有限長	0.2946	680

7. ま と め

杭の設計上重要な要素である水平方向地盤反力係数の深さ方向の分布を求めるために、標準砂を地盤として、模型杭による基礎的な水平載荷実験の結果、次の様な知見を得た。

片引き載荷では、載荷状態で衝撃を与えると、杭中央部に極端なひずみの増大が見られ、そこから除荷の過程では、ひずみは杭頭部から減少する。そのため、先端部に応力の集中が移行する。これは、地震時の挙動や断面変化の位置を示唆しているものと思われる。図-8、図-9にそれぞれ荷重-変位及び、荷重-地盤係数の相関を示す。図-8ではやや良い相関が見られるが、図-9ではCASE2が他の二例と異なった傾向が見られる。模型土圧実験等によると、“乾燥標準砂のゆるずめでは、水平地盤係数は深さに依存しない”という例も有り、今後、荷重等の条件を変えた場合についてCASE 2の検討を行う所存であるが、両振り載荷の結果では他の二例に比べて合理的ともいえる様子が見られる。

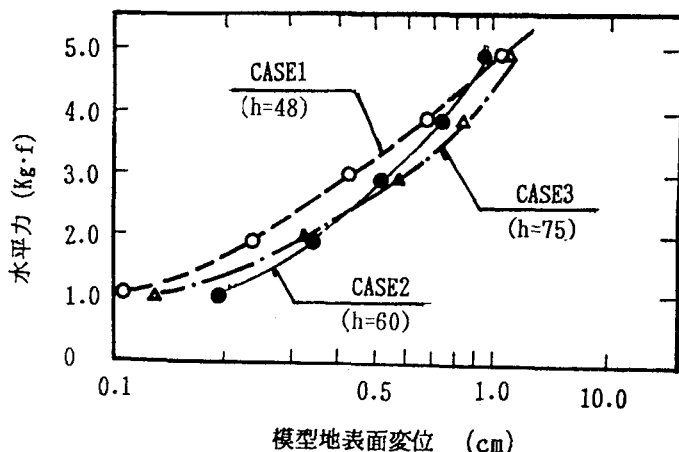


図-8 荷重-変位の相関曲線

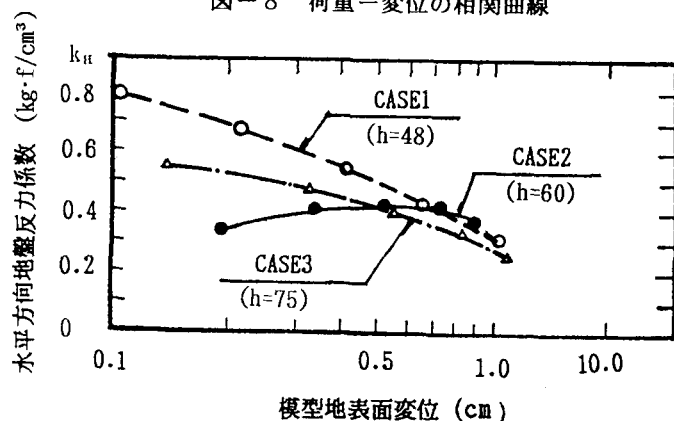


図-9 荷重-地盤係数の相関曲線

本実験では模型杭によって多くのデータを得ることが出来た。これは正にパイプ内にひずみゲージを貼る事によって可能となったものである。これらの実験結果を基に今後、杭頭モーメント・軸力等複合荷重の条件下に於ける挙動、二層及び多層地盤、粘弾性地盤に於ける挙動、地震時の共振モード、組杭等について実験・研究を進める所存である。

おわりに、この実験を手伝ってくれた北海学園大学工学部土木工学科4年、谷嘉幸・松田孝彦の両君に感謝の意を表します。

参考文献

- 日本道路協会：道路橋示方書IV下部構造編
- 日本道路協会：杭基礎設計便覧
- 土質工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説
- 横山幸満：杭構造物の計算法と計算例、山海堂