

流速場における混成堤断面の被災状況の相違による ブロック安定性検討

大熊義夫* ・興野俊也**・柴崎尚史***
安田勝則****・中野 修*****

本検討は、ケーソン式混成堤の被覆ブロックに着目し、初期被災を考慮した後の被災モードの把握を水理模型実験にて確認し、被覆ブロックの安定性能について評価するとともに、数値波動水路 (CADMAS-SURF) を用いた規則波解析を行い、被覆ブロック周辺の流速場からその適用性を検討した。水理実験の結果、被覆ブロックは法先からブロック移動が進行する被災モードであり、また、斜面上での安定性能が低下することが確認された。また、数値波動水路の流速値より推定したイースパッシュ定数は、実験を再現しその妥当性が確認された。

1. はじめに

ケーソン式混成堤は、我が国の代表的な防波堤構造形式であり、その設計法は体系化され使用されてきているが、最近では、新しい設計手法として堤体の滑動を許容する性能設計手法の検討が進められている。一方、ケーソンの基礎マウンドを被覆する重要な構成材料である被覆ブロックについては、これまで K_D 値、安定数 N_s を用いたハドソン式により所要重量の算定がされてきた。しかし、防波堤の性能設計を進める上ではこの被覆ブロックの被災モードの把握や被災状況を考慮した断面の性能を評価することも重要である。

近年は、数値波動水路 (CADMAS-SURF、沿岸開発技術センター、2001) が実用化され、被覆マウンド近傍の流速場の算定が直接可能となってきたことから、本研究では、被覆ブロックの被災を考慮したケーソン式混成堤被覆マウンドの水理実験を行い、被災モードを把握するとともに、数値波動水路 (CADMAS-SURF、沿岸開発技術センター、2001) による解析との比較からその適用性と被災後の被覆ブロック並びにマウンド部の断面性能変化について検討した。

2. 検討断面

対象としたケーソン式混成堤は、図-1 に示すよう設置水深 $h=13$ m、マウンド法肩水深 $h'=10$ m、 $h'/h=0.77$ の比較的低マウンド条件のものである。被覆ブロック設置部は、幅 2.6 m、高さ 1.6 m、 K_D 値 15 (砕波条件)、重量 80 kN の異形ブロックがケーソン前面岸沖方向に 1 層、4 個、2 列が互い違いに配置され、計 8 個で 1 組みが構成される断面となっている。(1) 式から算定される被覆ブロックの限界波高は、 $H_{1/3}=6.6$ m である。この断面条件に対し、実構造物では、法先ブロックがグラベルマットを越えて沖側へ移動する事象が確認され補修が実

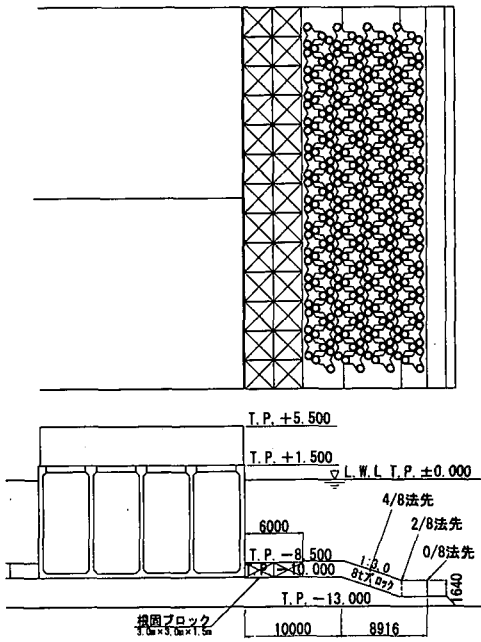


図-1 ケーソン式混成堤 標準断面

施されている。

K_D 値を用いたハドソン式

$$M = \frac{\rho_r \cdot H^3}{K_D \cdot (S_r - 1)^3 \cdot \cot \alpha} \dots\dots\dots (1)$$

M : 所要質量 (t), ρ_r : ブロックの密度 (t/m^3), H : 有義波高 (m), K_D : 定数, S_r : 捨石等の比重, α : 斜面勾配

3. 実験概要

図-1 に示すケーソン式混成堤を対象とし、前面被覆ブロックの被災影響による断面性能の変化を把握するため、水理模型実験を実施した。実験は、長さ 78 m、深さ 1.2 m、幅 0.9 m の 2 次元造波水路に勾配 1/100 のモルタル床を製作して行った。模型堤体は、縮尺 1/40 とした。被覆ブロックの被災影響を考慮するため、断面条件として、被覆ブロックの移動がない「全面被覆 (設計断面)」

* 正会員 東電設計㈱ 第二土木本部 港湾・海岸部
** 正会員 東京電力㈱ 技術開発研究所 主管研究員
*** 正会員 東京電力㈱ 原子力技術部 副長
**** 正会員 東京電力㈱ 技術開発研究所
***** 正会員 修(工) 東京電力㈱ 東火力事業所 係修部

と移動形態である法先側の被覆ブロック2個が移動した状態を模擬した「2/8撤去断面」(岸沖方向8個中2個撤去を表す),更に2個計4個が移動した状態を模擬した「4/8撤去断面」,「補強断面」として2/8断面の法先に補強ブロック(300 kN)を設置した4種類を実施した。

実験波は,規則波,不規則波(Wallops型スペクトル($m=7$))とした。規則波実験は,被覆ブロックの移動限界波高を求めるため,2.0 mから0.5 mピッチで波高を増大させ移動状況を確認した。各波高階級の作用波数は100波(20波×5回)とした。また,不規則波実験は,200波を5回(合計1000波)作用させた。いずれも被覆ブロックの並べ直しは行わず,被害個数を累積した。

実験条件を表一1にまとめて示す。

表一1 実験条件

実験縮尺	1/40
海底勾配	1/100
堤体設置水深 h (cm)	32.5 (13 m) 34.0 (13.6 m)
マウンド天端面上水深 h' (cm)	25.0 (10 m)
マウンド前口幅 B_M (cm)	25.0 (10 m)
マウンド法面勾配 $\tan \theta$	1/3
被覆ブロックの重量 W (N)	1.23 N (80 kN)
被覆ブロック設置範囲	全面被覆, 2/8撤去断面, 4/8撤去断面, 補強断面 (2/8断面+法先補強ブロック)
ケーソン天端高 h_c (cm)	13.75 (5.5 m)
規則波周期 T (s)	1.26 (8), 1.74 (11), 2.06 (13)
規則波波高 H (cm)	5.0~23 (2.0~9.0 m)
不規則波 有義周期 $T_{1/3}$ (s)	1.26, 1.74, 2.06
不規則波 有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	12.5 (5 m), 16.3 (6.5 m), 18.0 (7.2 m), 18.8 (7.5 m)
不規則波スペクトル形状指数 m	7

() 内は,現地スケール

4. 実験結果

(1) 被災状況と移動限界波高

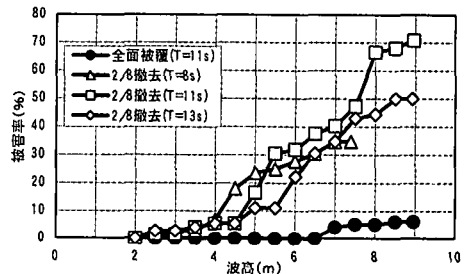
図一2は,規則波実験における波高と被害率(移動個数/総個数)の関係を示している。設計断面の場合,周期 $T=11$ s,波高 $H=7.0$ mで移動が生じた。移動形態は,実構造物でも生じている法先ブロックの沖側への移動であり,谷本ら(1982)の実験による低マウンド条件同様,引き波時に沖側へ移動するモードであった。移動した被覆ブロックは,グラベルマットを越えて徐々に沖合に向かって移動した。これは,被覆ブロックの移動に関与する水平方向流速成分が,重複波における節の位置で最大値を示すことから,その影響を受けて沖側へ順次移動しているものと推察された。しかし,その後波高が増大しても被害率の増加は少なく,比較的安定した状況であった。その他,全面被覆条件下では,波高 $H=7.4$ m,周期 $T=8$ s,波高 $H=9.0$ m, $T=13$ s時にはロッキングは生じるものの,ブロックの移動は生じておらず, $T=11$ sが波高と周期の関係により,水平方向流速が支配的となったと推察される。

一方,2/8断面は,いずれの周期においても,波高 $H=2.5$ mで法面部ブロックが移動し始め,波高 $H=4.5$ m以上から被害率が急激に増加する傾向を示した。これは沖側の隣接ブロックの不存在による拘束効果の低下とブロック近傍流速の増大等により被覆ブロックの安定性が低下したためと考えられる。特に,水平方向流速成分が大きくなる重複波の節の生ずる位置が近づく $T=11$ sが $T=13$ sに比べて累積被害率が大きくなる傾向が見られる。

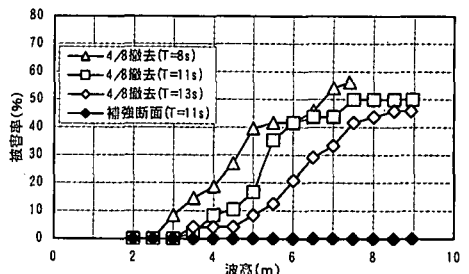
更に4/8断面条件では,移動限界波高 $H=3.5$ mで移動が始まり,重複波の節の位置に近い所に生ずる周期順 $T=13$ s, $T=11$ s, $T=8$ sにしたがって,被害率が高くなる傾向にある。最終的に被害率約50%で収束する傾向が見られ,根固め方塊に接した法肩部2個のみが残存するまで移動を受けることが観察された。

一方,補強断面は,全く移動を生じない結果であり,法先の補強が有効に機能することが確認された。

図一3は,不規則波実験における波数と被害率の関係を示したものである。全面被覆の場合は規則波実験同様,被害率は低い。一方,初期移動を考慮した場合,被覆ブロックは初期の波数200波で被災の大半が生じる傾向を示した。木村ら(1995)による変形を許容したマウンド被覆石の実験の場合,収束被害率が500波時点の被害率の1.1~1.5になるのとは大きく異なり,被覆ブロックの一層被覆,単一仕様が被災の進行に影響していると推察



(a) 全面被覆, 2/8撤去断面



(b) 4/8撤去断面, 補強断面

図一2 被覆ブロック被害率

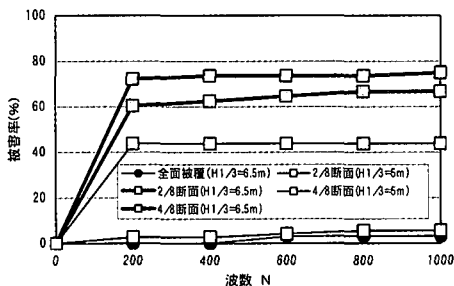


図-3 作用波数と被害率

された。

(2) 安定数 N_s

図-4 は、実験結果の移動限界波高とブロック重量を元に (2) 式 (ハドソン式) で示される被覆ブロックの安定数 N_s を算定した結果を示している。被覆ブロックの場合、法肩部は $N_s=3.0\sim 4.5$ を示すのに比べ、法先部のブロックは $N_s=2.0\sim 4.0$ 程度と低い傾向にある。これにより法先から被災が進行しやすいのが分かる。また、2/8、4/8 断面では、値は急激に低下し、 $N_s=1.3\sim 1.8$ となる。このように斜面部周辺の被覆ブロックは、平坦面に比べ安定数 N_s が 50% 程度低減する可能性が把握された。

$$N_s^3 = \frac{\rho_r \cdot H^3}{M \cdot (S_r - 1)^3} \quad (2)$$

ここに、 M : ブロック質量(t), ρ_r : ブロックの密度(t/m³), H : 移動限界波高(m), N_s : 安定数, S_r : ブロックの比重

(3) 被覆ブロック周辺の流速

流れに対する被覆材の安定重量は、流速の 6 乗則に比例することが示されており(谷本ら, 1982), 被覆ブロック移動時の周辺流速を計測することでその関係を求めることとした。法肩, 斜面部, 法先の被覆ブロック上に計 4 機の流速計を設置し、岸沖方向の流速値について整理した。図-5 は、法先移動が生じた波高 $H=7.0$ m, 周期 $T=11$ s と法先移動を考慮した移動限界波高 $H=3.5$

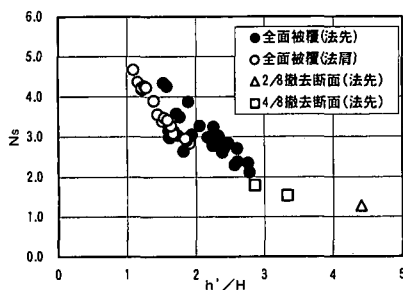


図-4 被覆ブロック安定数

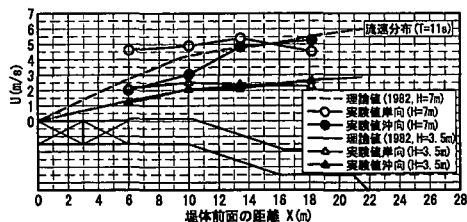


図-5 被覆ブロック上の流速値

m, 周期 $T=11$ s における流速分布である。図には谷本ら (1982) による水底水粒子速度の最大値 U を併せて示す。ブロック周辺流速は、堤体から離れるに従い、重複波の節に近づく増大する傾向は理論流速と一致する。 $H=7.0$ m では法肩部は岸向きの流速が大きく、法先部は沖向きの流速がやや大きくなる傾向を示し、谷本らによる被覆ブロックの移動方向と整合する。初期の被災が生じる法先部は流速 4.5 m/s であった。一方、法先移動を考慮した 4/8 断面の限界波高 $H=3.5$ m における斜面部流速は、2.0 m/s を示し、流速レベルで 55% の段階から、移動を生じるものと把握された。

以上の水理実験の結果、比較的低マウンド条件における被覆ブロックは、法先部より移動を生じ、更に移動が進行し斜面部に至った段階で急激に安定性が低下し、被害が拡大する被災モードになると把握された。

一方、被覆ブロック下面の捨石マウンド材は、法先ので僅かに移動するものの、斜面部での顕著な移動飛散は生じていなかった。

5. 数値波動水路による流況場の計算

被覆ブロック周辺での流れをより適切に把握するため、実験と同一断面条件下で数値波動水路 (CADMAS-SURF, 沿岸開発技術センター, 2001) による計算を実施した。計算条件を表-2 に示す。断面条件は、全面被覆, 4/8 撤去断面, 被覆ブロックを設置しない 8/8 撤去断面, 補強断面の 4 断面とした。

(1) 被覆ブロック上の流況場

図-6 は、 $H=7.0$ m, $T=11$ s における各断面条件における引き波時の流速ベクトルである。全面被覆は法先ブロック上の流速が最も大きく、4/8 断面は法肩上の流速が大きい。引き波から押し波へ移行するときは、ブロック段差部で渦を形成する様子が見られた。また、流速値は、押し波時よりも引き波時の方が大きく、被災モードと整合する。図-7 に、押し波時におけるケーソン堤越流時の流速ベクトルを示す。被災が進行するにつれ、越波時の流速ベクトルが大きくなり、より堤体背後に向かう傾向にあるのが確認され、被覆ブロックの範囲により防波堤本来の伝達率機能も変化することが把握された。

表-2 計算条件

実験縮尺	1/40
造波方法	造波ソース 流れ関数法 B 5 次
端部境界	減衰帯+放射境界
差分スキーム	VP-DONOR-0.2
境界条件	$\beta, u \cdot w$: slip F 値: free
気泡上昇速度	0.2 m/s
水滴落下速度	Free Random
ポーラス下限値	0.001
慣性係数 C_M	ブロック: 1.2, マウンド 1.2
抗力係数 C_D	ブロック: 1.0, マウンド 1.0
空隙率 e	ブロック: 0.5, マウンド 0.4
被覆ブロック設置範囲	全面被覆, 4/8 撤去断面, 8/8 撤去断面, 補強断面 (2/8 断面+法先補強ブロック)
規則波周期 T (s)	11, 13
規則波波高 H (cm)	3.5, 7.0

(2) 被覆ブロック上の流速分布

図-8 は、数値波動水路による被覆ブロック上(捨石マウンドが露出した断面では捨石マウンド上)の流速空間分布を示す。図には、谷本ら (1982) による捨石マウンド上の理論流速と実験値も併せて示す。全面被覆の場合、計算は実験を良く再現する。また、法先部のブロックに流速値 4.5 m/s から 5.7 m/s へと増加する上昇部が存在し、被覆ブロック高さの影響を受け、被災を受けやすくなっているのが分かる。4/8 断面 ($H=3.5$ m) も、計算と実験は整合するとともに、被覆ブロックと捨石マウンドの境界部で流速が最大となり、端部ブロックの移動が生じやすいことがわかる。一方、端部ブロックから沖側の捨石マウンドが露出した面では、流速が低下する傾向を示し、約 1 m/s の流速低減が生じている。これは、実質的な水深の増による効果と被覆ブロック上に主に流下する流れの効果と推察された。この斜面上に露出した捨石マウンド材は、実験においても重量 5.0 kN 相当の

材料の移動は観測されず、マウンド材の安定性が確認された。

(3) イスパッシュ定数

図-9, 10 は、数値波動水路による流速値と被覆ブロック、捨石マウンド重量を元に、(3)式に従い被覆材の安定重量算定に用いる港湾基準 C.E.R.C 式におけるイスパッシュ定数 y を算定した結果を示す。港湾基準では、埋込だ石の場合、 $y=1.20$ 、露出した石の場合、 $y=0.86$ である。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 M : 安定質量 (t)、 ρ_r : 捨石等の密度 (t/m^3)、 U : 上面における流れの速度 (m/s)、 g : 重力加速度 (m/s^2)、 y : イスパッシュの定数、 S_r : 捨石等の比重、 θ : 斜面勾配

全面被覆の法先被覆ブロックの場合、 $y=1.065$ となり、岩崎ら (1983) の異形ブロック $y=1.08$ より、やや低下する程度である。一方、4/8 断面 $H=3.5$ m の場合は、 $y=0.47$ となり、露出した石の状態より大きく低下し、斜面上の被覆ブロックの機能低下が著しい。8/8 断面結果を用い、捨石マウンド材のイスパッシュ定数を求めた場合、 $y=1.33$ となり、埋込まれた石 1.20 より大きく、斜面上の石材が周辺石材とのかみ合わせ効果等により抵抗性があることが推察された。

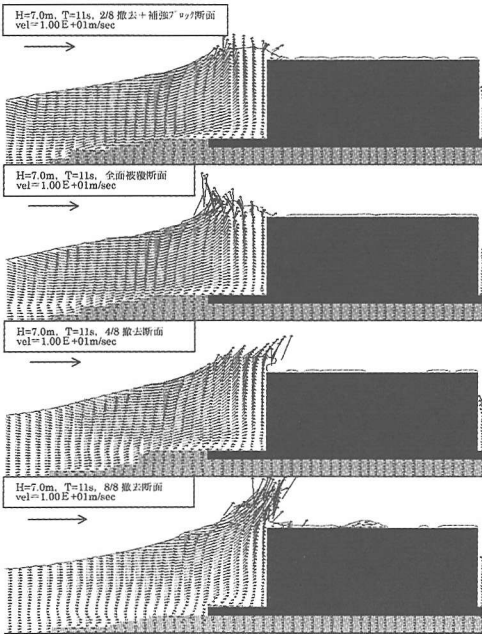
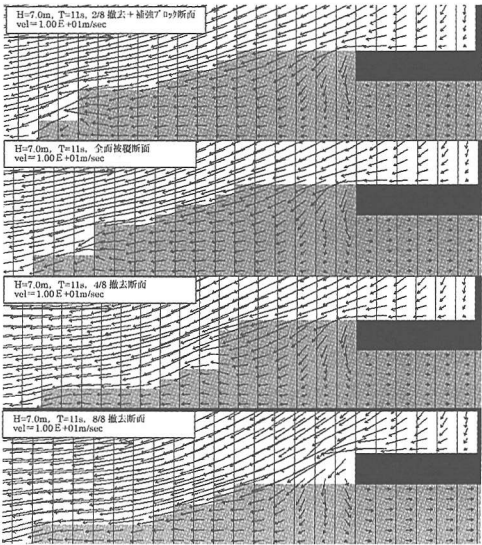
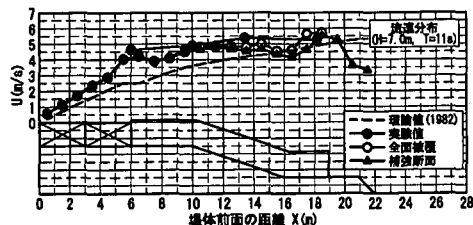
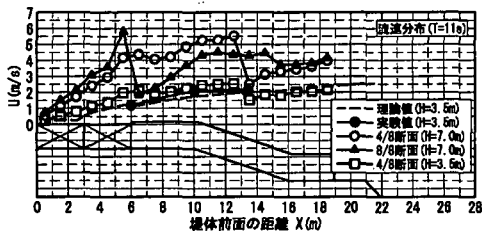


図-6 被覆ブロック上の流況場 (引き波時)
(上段より、補強断面、全面被覆、4/8 断面、8/8 断面)

図-7 越流状況 (押し波時) (上段より、補強断面、全面被覆、4/8 断面、8/8 断面)

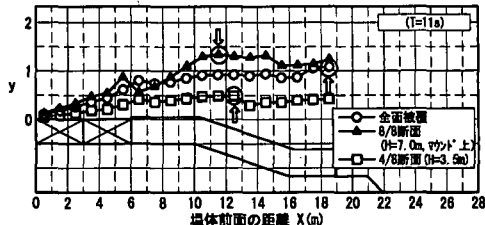
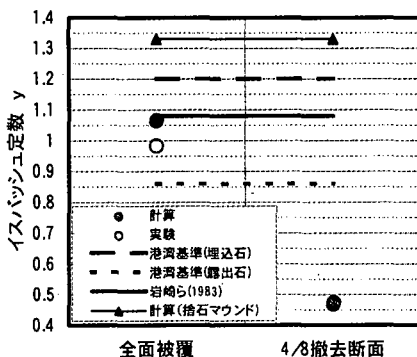


(a) 全面被覆，補強断面



(b) 4/8 断面，8/8 断面

図-8 流速分布


図-9 流速分布から推定した y 定数

図-10 断面状態別の y 定数 ($T=11$ s)

6. ま と め

本報告における結論をまとめると以下ようになる。

- ① 低マウンド条件におけるケーソン堤前面被覆ブロックは、法肩より法先ブロックの安定数が低く、沖側移動が初期の被災となる。
- ② 法先被覆ブロックの移動後、捨石マウンド斜面上の被覆ブロックの拘束が低下した段階で、斜面部被覆ブロックの安定数は約 50% 低下、イシュバッシュ定数も約 55% 低下し、急激な被覆ブロックの移動が生じる被災モードとなる。
- ③ 斜面部の捨石材は、イシュバッシュ定数が比較的高く、被覆ブロックに比べ機能低下の影響は少ない。
- ④ 値波動水路による被覆ブロック周辺の流速値も法先が最も大きく、実験の被災箇所と一致した。また、実験値を再現し、その適用性が確認された。

本報告では、2 次元的な検討により被覆ブロックの被災状況の相違が安定性に及ぼす検討を実施した。今後、波向き効果を確認するとともに、数値波動水路と個別要素法を組み合わせ、被覆ブロック並びにマウンド材の被

災量を直接評価する手法について検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田鋼三・合田良実 (1982): 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 29 巻, 第 2 号, pp. 3-42.
- 高橋重雄・木村克俊・谷本勝利 (1990): 斜め入射波による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 29 巻, 第 2 号, pp. 3-36.
- 須藤賢哉・木村克俊・笹島隆彦・水野雄三・竹田英章 (1995): 変形を許容した混成堤マウンド被覆材の所要重量算定法, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 896-900.
- 岩崎敏夫・真野 明・中村武弘・堀越伸幸 (1984): 潜堤のマウンド材およびプレバックド堤に作用する定常流体力に関する実験的研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 527-531.
- 沿岸開発技術センター編 (2001): CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発 —数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書一, 沿岸開発技術ライブラリー, 296 p.
- 港湾の施設の技術上の基準・同解説: 188 p.