

Restoration of the Mississippi Delta: Lessons from Hurricanes Katrina and Rita ミシシッピーデルタの再生：ハリケーン・カトリーナとリタからの教訓

John W. Day Jr.,^{1*} Donald F. Boesch,² Ellis J. Clairain,³ G. Paul Kemp,⁴ Shirley B. Laska,⁵ William J. Mitsch,⁶ Kenneth Orth,⁷ Hassan Mashriqui,⁸ Denise J. Reed,⁹ Leonard Shabman,¹⁰ Charles A. Simerstad,¹¹ Bill J. Streever,¹² Robert R. Twilley,¹ Chester C. Watson,¹³ John T. Wells,¹⁴ Dennis F. Whigham¹⁵

¹Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA. ²University of Maryland Center for Environmental Science, Post Office Box 775, Cambridge, MD 21613, USA. ³Engineer Research and Development Center, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS 39180, USA. ⁴The Hurricane Center, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA. ⁵Department of Sociology, University of New Orleans, New Orleans, LA 70148, USA. ⁶Olentangy River Wetland Research Park, The Ohio State University, 352 West Dordridge Street, Columbus, OH 43202, USA. ⁷Institute for Water Resources, U.S. Army Corps of Engineers, 7701 Telegraph Road, Alexandria, VA 22315, USA. ⁸Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA. ⁹Department of Geology and Geophysics, University of New Orleans, New Orleans, LA 70148, USA. ¹⁰Resources for the Future, 1616 P Street, NW, Washington, DC 20036, USA. ¹¹School of Aquatic and Fishery Sciences, Box 355020, University of Washington, Seattle, WA 98015, USA. ¹²BP Exploration (Alaska), Post Office Box 196612, Anchorage, AK 99519-6612, USA. ¹³Engineering Research Center, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA. ¹⁴Virginia Institute of Marine Science, Box 1346, Gloucester Point, VA 23062, USA. ¹⁵Smithsonian Environmental Research Center, Box 28, Edgewater, MD 21037, USA *To whom correspondence should be addressed. E-mail: johnday@lsu.edu

Hurricanes Katrina and Rita showed the vulnerability of coastal communities and how human activities that caused deterioration of the Mississippi Deltaic Plain (MDP) exacerbated this vulnerability. The MDP formed by dynamic interactions between river and coast at various temporal and spatial scales, and human activity has reduced these interactions at all scales. Restoration efforts aim to re-establish this dynamic interaction, with emphasis on reconnecting the river to the deltaic plain. Science must guide MDP restoration, which will provide insights into delta restoration elsewhere and generally into coasts facing climate change in times of resource scarcity.

ハリケーン・カトリーナとリタは、沿岸部地域社会の脆弱性とミシシッピーデルタ平原 (Mississippi Deltaic Plain: MDP) の荒廃を招いた人為的活動がいかにその脆弱性を助長したかを露呈した。様々な時間的、空間的尺度での河川と沿岸部とのダイナミックな相互作用と人為的活動により形成されたこの MDP がどの尺度であれその相互作用を減少させてきた。再生活動にはこのダイナミックな相互作用を立て直そうとする狙いがある。重点は河川と三角州平原との再接続である。科学を MDP 再生の指針としなければならない。それが、他の地でのデルタ再生に、そして広くは、資源の稀少化が進む時代にあって気候変動に直面する沿岸部に関する知見をもたらすであろう。

The Mississippi Deltaic Plain (MDP) is a 25,000-km² dynamic landscape of water, wetlands, and low upland ridges, formed as a series of overlapping delta lobes. An understanding of how humans and Hurricanes Katrina and Rita affected the MDP in 2005 requires knowledge about the complex processes that formed and sustained the delta for millennia before human impact. The delta emerged about 6000 to 7000 years ago after eustatic sea level stabilized (Fig. 1) (1-3). A variety of processes formed and sustained the delta and increased its overall size (Table 1) (4). Riverine sediments were deposited at river mouths and via overbank flooding, crevasse formation, and older distributaries (2, 3). Crevassees were usually short-lived (<100 years) and formed depositional splays about 10 km wide, as compared to hundreds of kilometers for delta lobes (5). Many former distributaries functioned, either permanently or seasonally, at the beginning of European colonization, around 1700. A skeletal framework of distributary ridges and barrier islands (6) protected interior fresher wetlands from marine forces and saltwater intrusion (Fig. 1).

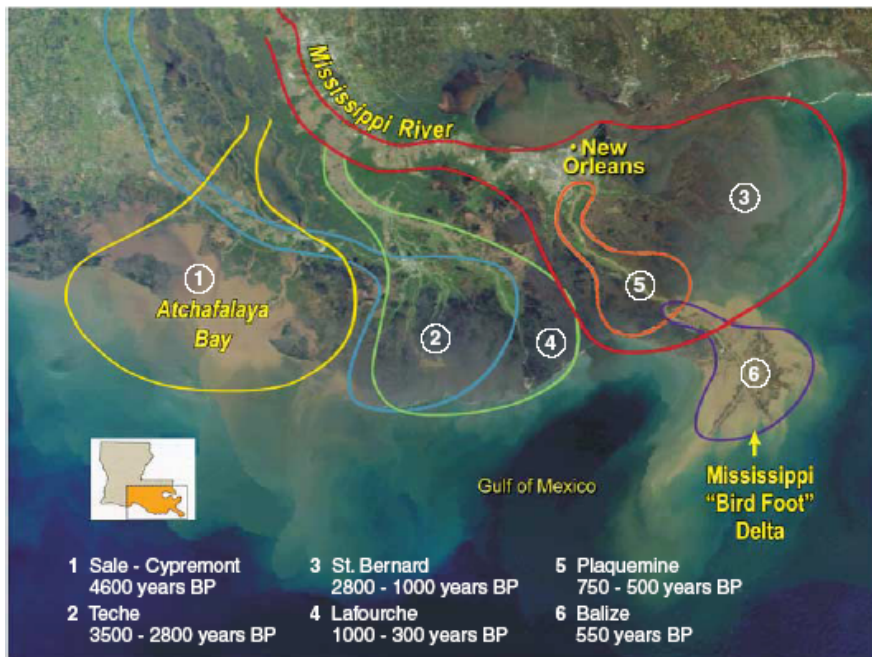
ミシシッピデルタ平原 (MDP) は、25,000km² に広がる、水域、湿地、砂浜で構成され、三角州が重なり合い形成されたダイナミックな地形である。この MDP に対して人間活動とハリケーン・カトリーナとリタが 2005 年にどのような影響をもたらしたのかを理解するには、人為的影響が生じるまで何千年もの間にデルタを形成し、維持してきた複合的なプロセスに関する知識が必要である。このデルタは、高い地球規模の海面の変化が高い水位で安定していた約 6,000~7,000 年前頃から形成され始めた (図 1) (1-3)。様々なプロセスがデルタを形成・維持し、全体として規模を拡大し続けてきた (表 1) (4)。河川の運ぶ土砂は、河口部に堆積するばかりでなく、また、河岸を越える洪水や、河岸の低い部分や、旧河道によって河道の外にも運ばれた (2, 3)。河道外への堆積は、多くの場合 100 年未満の短期間であったが、その堆積域は数百キロに及ぶ三角州のうち、約 10 キロにも及んでいる (5)。多くの旧河道は、1700 年頃の欧州植民地化当初には恒常的または季節的に機能していた。旧河道の自然堤防や防波島 (6) が、内陸の湿地帯を、海の波浪や塩水侵入から保護していたのである (図 1)。

To survive, the soil surface of coastal wetlands must grow vertically to keep pace with local sea level. This is critical in the MDP, where geologic subsidence causes a relative sea-level rise (RSLR) of about 1 cm/year as compared to ~1.5 mm/year of eustatic SLR. Plant growth contributes organic soils; the rest of the vertical growth comes from mineral sediments (7). Riverine inputs benefit coastal wetlands in several ways: Mineral sediments increase accretion and bulk density, nutrients enhance plant growth, fresh water buffers saltwater intrusion, and iron precipitates toxic sulfides (8, 9). The deposition of older river sediments resuspended from bays and the nearshore Gulf of Mexico or eroded from other wetlands is especially important during winter storms and hurricanes (7, 10, 11). However, most sediment is introduced directly from the river (12).

沿岸の湿地の機能を存続させるには、海面の上昇に応じて土地を高くして行かなくてはならない。これは、年間 1.5mm 以下の地球規模の海面上昇が相対的に年間 1cm に相当するような沈降性の地質の MDP においては特に重要なことである。植物の成長は有機体を形成し、残りは堆積したによってもたらされる (7)。河川の物資供給は色々な意味で沿岸の湿地帯に貢献している。供給される無機物は植物付着して密度を高め、栄養塩は植物の成長を促し、淡水は塩水浸入を抑え、鉄分は有害硫化物を沈降させている (8, 9)。メキシコ湾沿岸から再攪拌されたり、他の湿地から浸食される古い河川堆積物は、冬の嵐やハリケーンの時期には特に重要である (7, 10, 11)。しかし、ほとんどの堆積物は河川から直接入り込んだものである (12)。

In the MDP, barrier islands grow and diminish in conjunction with deltaic lobe cycles (Fig. 2 (13). Coarser sediments are deposited at active river mouths, and as the delta advances, sand is transported laterally to form beach ridges. After channel abandonment, deltafront sands are re-worked to form erosional headlands attached to marshes behind the barrier. Waves and currents rework and redistribute headland sands laterally to form flanking barrier islands, and the islands move landward as sand is transported in wash-over fans. As wetlands deteriorate, a barrier island arc is formed. Over time, the barriers fragment into smaller islands, and extensive washover terraces or sandy shoals are formed inshore of the islands, eventually producing a submerged complex of shoals and sand sheets. This process continues until another distributary channel forms and the cycle begins again.

MDP では、三角州の形成サイクルに併せて防波島が成長し、また消滅する(図2)(13)。土砂を供給する河川の河口部に比較的粗い堆積物が堆積し、三角州の前進に伴って砂が左右に運ばれて汀線を形成する。河道の転換が起こると、最前面の砂地は浸食性のヘッドランドとなり、後背湿地を保護するバリアとして機能する。波や沿岸流れがヘッドランドの砂を横方向に再配分し、隣接する防波島を形成するが、防波島は陸地の方に移動し、砂は扇状に流されてしまう。湿地は消滅し、防波島弧が形成される。やがて、バリアは小さな島に別れ、広範囲に拡散された段丘あるいは砂州が弧の内側に形成され、最終的に多くの浅瀬となる。このプロセスは、新たな河道が形成され三角州形成サイクルが再び始まるまで続く。



- | | | |
|----------------------|---------------------|------------------------|
| 1 サール-シブルモン 4600年前 | 2 テッシュ川 3500～2800年前 | 3 セントベルナルド 2800～1000年前 |
| 4 ラフォーシュ川 1000～300年前 | 5 プラクミン 750～500年前 | 6 ベリーズ 550年前 |

Fig. 1. The MDP was formed by a series of overlapping delta lobes as the river occupied different channels. The delta is characterized by current and abandoned river channels, barrier islands, and extensive coastal wetlands. Currently, about two-thirds of flow is discharged via the lower Mississippi directly to the Gulf and one-third is discharged via the Atchafalaya River to a shallow bay where a new delta is forming. The location of levees is shown on the lower river as well as the location of the MRGO. The turbid plume shown on the right results from a river diversion. BP, before the present. [Modified from (66)]

図1 MDP は河川が色々な水路を占有してデルタローブが重なりあい形成された。この三角州の特徴は、現在の河道や旧河道と、防波島、そして広範囲に及ぶ沿岸湿地である。現在、流量の約3分の2はミシシッピー川下流からメキシコ湾に、3分の1はアチャファラヤ川から新たにデルタが形成されている浅い湾へと流下している。堤防の場所は下流とMRGOに表示している。右手に表示したぼんやりした羽毛状は、河川の迂回によるものである。BPはBefore the Present(～年前) [(66)から作成]

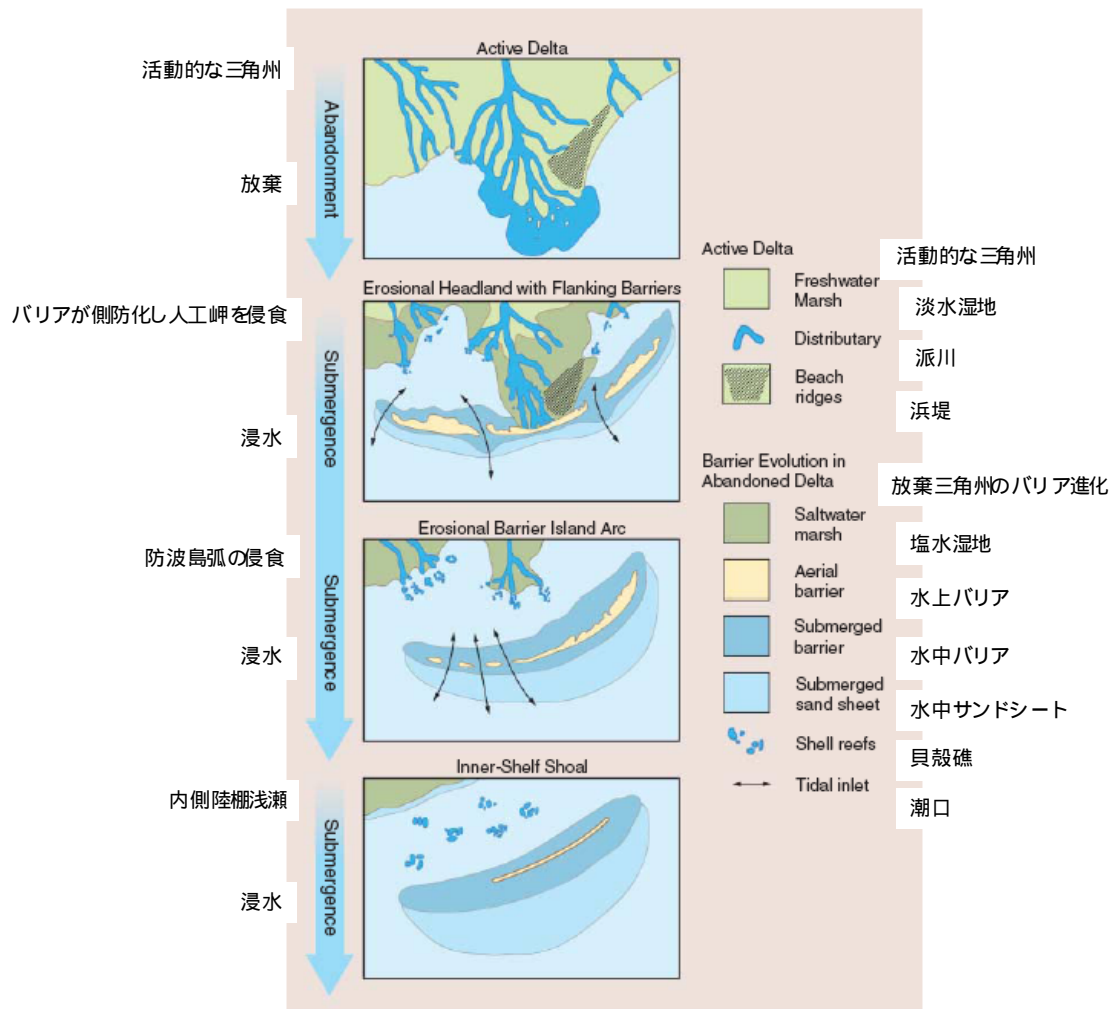


Fig. 2. The barrier island cycle in the MDP [Modified from (13)]

図2 MDPの防波(バリア)島周期 [(13)から作成]

Deterioration of the MDP

Since 1900, about 4900 km² of wetlands in coastal Louisiana have been lost at rates as high as 100 km²/year (14, 15). Wetland loss is much lower on the central coast, where the Atchafalaya River, a distributary that carries one-third of the flow of the Mississippi River, discharges into a shallow inshore bay (16). Loss occurs at the wetland edge because of wave erosion and in interior wetlands by submergence as soil accretion fails to keep up with RSLR (17). Most loss was initially internal, but as wetlands opened up, wave erosion has become more important (18). Although a delta grows and decays as a natural outcome of the delta lobe cycle, the MDP experienced an overall net growth for several thousand years after the sea level stabilized. Human activities during the 20th century reversed this trend (15, 17, 19).

MDP の荒廃

1900 年以降、年間100km²もの速さで、ルイジアナ沿岸部の湿地帯が約 4,900km²も失われている (14, 15)。湿地帯の消失は、ミシシッピ川の流量の 1/3 を占めるアチャファラヤ川が淡い湾へと流入する、中央海岸では少ない (16)。沿岸部の湿地帯消失は波の浸食が原因であるが、内陸部では土壌形成が海面上昇に追いつかず浸水してしまうためである (17)。当初は、内陸部の要因が問題であったが、湿地帯が海とつながってからは、波の浸食がより顕著になってきた (18)。三角州は、自然のサイクルによって形成され崩壊するものであるが、MDP は数千年かかって全体として成長してきた。20 世紀の人為的な活動が、この動きを逆行させたのである (15, 17, 19)。

The main cause of loss was the isolation of the river from the MDP (17, 19). The river is now almost completely leveed, preventing over-bank flooding and crevasse formation, so most of its discharge is into the deep Gulf of Mexico (Fig. 1). With the exception of the Atchafalaya River, all distributaries of the river have been closed. The lower Mississippi is prevented from seeking a shorter course to the Gulf via the Atchafalaya by the Old River Control Structure.

消失の主な原因は、河川を MDP から分離したことである (17, 19)。河川には今やほとんど堤防が築かれ、越流洪水や破堤も防止されているため、その流出のほとんどは深いメキシコ湾に流れこんでいる (図 1)。アチャファラヤ川を例外として、ミシシッピ川の派川はすべて閉鎖された。ミシシッピ川下流域では、古い河川管理施設 (The Old River Control Structure) のために、アチャファラヤ川以外には、より短い流路によってメキシコ湾に流れることはできない。

Over 15,000 km of canals have been dredged for navigation, drainage, and logging, but mostly for oil and gas development (17). This and the construction of impoundments have altered the hydrology that sustains the system (20). Spoil banks associated with canals reduce sheet flow of water through wetlands (21). Deep, straight navigation canals cause saltwater intrusion and the death of freshwater plant communities (17). One of the most notable is the Mississippi River Gulf Outlet (MRGO), a 12-by-300-m canal dredged through the Breton Sound Basin in 1963. Saltwater intrusion via the MRGO killed thousands of hectares of freshwater wetland forests. As Katrina's path crossed Breton Sound, levees along the MRGO were breached and storm surge funneled through the MRGO and into the Gulf Intracoastal Waterway to contribute to the flooding of New Orleans. The withdrawal of oil, natural gas, and formation waters lowered pressures in underlying geologic features, probably causing downfaulting and increasing the rate of subsidence by two to three times during active oil and gas production (22).

15,000km 以上の運河が、舟運、排水、水上輸送のために浚渫されたが、ほとんどは石油・ガス

開発が目的だった(17)。これに加えて、貯水池の建設も伴い、システムを維持する水文環境を変えてしまった(20)。水路に周りの邪魔な堤防が、湿地全体に水が行き渡ることを減少させた(21)。深くまっすぐな運河は、塩水を遡上させ、淡水生の植物群落が死滅させた(17)。最も顕著なのは、ミシシッピ川放水路(Mississippi River Gulf Outlet MRGO) 1963年にブレトンサウンド地域(Breton Sound Basin)に掘削された12x300mの運河である。MRGOを遡上した塩水は数千haに及ぶ淡水湿地性の森林を消滅させた。カトリーナの進路がブレトンサウンドを横断したため、MRGOの堤防が決壊し、高潮がMRGOから湾岸連絡運河(Gulf Intercoastal Waterway)に流れ込み、ニューオーリンズに洪水が発生した。石油、天然ガス、地層水の採掘によって基層地質の圧力を低下させるため、石油・ガスの生産時には、断層作用による地盤沈下は2~3倍の速度になっていると見られている。(22)。

The construction of reservoirs in the Mississippi basin dramatically reduced the supply of both suspended and bedload sediments to the delta (6). Inputs of sand are particularly important for maintaining barrier islands; thus, all barrier islands in the deltaic plain are deteriorating (13) because the deterioration phase of the barrier island cycle has accelerated while the development phase has been greatly reduced.

ミシシッピ川流域に貯水池を作ったため、浮遊土砂や掃流土砂の三角州地域への供給は劇的に減少している(6)。砂の供給は防波島の維持には特に重要で、防波島の形成作用がなくなる中で、崩壊作用が加速されたことから、MDPのすべての防波島は荒廃を続けている(13)。

Table 1. A hierarchy of forcings or pulsing events affecting the formation and sustainability of deltas. [Modified from (4)]

Event	Time scale	Impact
Major changes in river channels	500–1000 years	New delta lobe formation (avulsions), major sediment deposition
Major river floods	50–100 years	Avulsion enhancement, major sediment deposition, enhancement of crevasse formation and growth
Major storms	20–25 years	Major sediment deposition, enhanced production
Average river floods	Annual	Enhanced sediment deposition, freshening (lower salinity), nutrient input, enhanced primary and secondary production
Normal storm events (frontal passage)	Weekly	Enhanced sediment deposition, enhanced organism transport, higher net materials transport
Tides	Daily	Marsh drainage, stimulated marsh production, low net transport of water and materials

表1 三角州の形成と持続可能性に影響を与える促成(forcing)または脈動(pulsing)の階層性[(4)から作成]

事象	時間的尺度	影響
河道の大規模変動	500 ~ 1000 年	新しい三角州形成、大規模な土砂堆積
大規模河川洪水	50 ~ 100 年	沖積作用の進行、大規模な土砂堆積、不連続部の形成と拡大
大型暴風雨	20 ~ 25 年	大規模な土砂堆積、植生の成長
平均的河川洪水	毎年	堆積進行、淡水化、養分補給、一次、二次植生成長
通常の暴風雨事象(前線通過)	毎週	堆積進行、有機物輸送の進行、物質総輸送量の増加
潮位変動	毎日	湿地排水、湿地生成促進、水と物質の輸送総量の減少

Hurricanes and Mississippi Delta Wetlands

Hurricanes are a regular, if episodic, force in the MDP. Thousands of tropical storms affected the delta as it grew over the past 6000 to 7000 years. Under some conditions, runoff generated by hurricane precipitation introduces fresh water and nutrients that reduce salinity and enhance coastal productivity (23). Hurricanes also deposit large amounts of resuspended sediments on wetland surfaces, helping to offset RSLR, and thus are important for the sustainability of marshes (7, 10). Hurricanes Katrina and Rita were the fourth and fifth most powerful storms to strike the MDP since 1893 with respect to maximum wind speed at landfall, but were more remarkable in both cases for the hundreds of kilometers of the coast affected by a storm surge of more than 3 m. As Katrina progressed across Breton Sound and Lake Borgne as a category 3 storm (sustained winds of 194 km hour⁻¹), it generated a storm surge that exceeded 10 m on the Mississippi coast and measured up to 6 m southeast of New Orleans, with up to 2 m of additional wave run-up in the most exposed locations (Fig. 3) (24). In southeast Louisiana, communities unprotected by levees were inundated, and the storm destroyed levees protecting eastern New Orleans and St. Bernard and Plaquemines parishes to the south and east. Floodwalls failed along drainage and navigation canals connected to Lakes Pontchartrain and Borgne, inundating most of the rest of New Orleans. Because much of this area is below sea level, the floodwaters remained for 3 or more weeks while emergency repairs were made and the water was pumped out. More than 1500 people died as a direct or indirect result of Hurricane Katrina, almost 1100 of them in Louisiana.

ハリケーンとミシシッピ三角州湿地

ハリケーンは、一過性とはいえ、MDP に定期的に訪れるエネルギーである。6,000 ~ 7,000 年の間に三角州が拡大を続ける過程でも、何度となく熱帯性低気圧（熱帯暴風雨）が襲った。条件によっては、ハリケーンの降雨により生じた流出が淡水や養分を運び込み、塩分濃度を下げ、沿岸部の生産性を高める（23）。ハリケーンはまた、大量の再攪拌土砂を湿地表面に堆積させ、RSLR の影響を相殺することから、湿地帯の持続性にとって重要である（7, 10）。ハリケーン・カトリーナとリタは上陸時の最大風速という点では 1893 年以降 MDP を襲った中でも 4 番目、5 番目に強力であったが、海岸線が数百キロにも渡って 3 メートルを超える高潮災害に見舞われたケースとして特筆される。カトリーナがブレトンサウンドとレークボーンをカテゴリー3 の勢力となり横断した時（風速毎時 194 km）、ミシシッピ沿岸部に 10m を超える高潮が発生し、ニューオーリンズ南東部では最大 6m が計測され、直撃を受けた場所ではさらに 2m の最大波浪が加わった（図 3）（24）。ルイジアナ南東部の無堤地域が冠水し、暴風雨によりニューオーリンズ東部と南東部のセントベルナルド区やプラクミン区を守る堤防が決壊した。防水壁は、ポンチャートレーン湖とボーン湖に接続する排水航行用運河に沿って破壊され、ニューオーリンズの他地域のほとんどが冠水した。この地域の多くは海拔ゼロメートル地帯であるため、緊急復旧とポンプ排水が行われても水は 3 週間以上残っていた。ハリケーン・カトリーナの直接間接の被害で 1,500 人以上が死亡、うち約 1100 人はルイジアナの住民だった。

Katrina and Rita deposited 5 to 10 cm of sediment over large areas of coastal wetlands (11). But about 100 km² of wetlands in the Breton Sound Basin lying in the storm path were converted to open water (25). Although some of this area is now 1 m or more deep, most of the damaged area is shallow mud flats interspersed with myriad marsh clumps uprooted by the storm. The disturbance of buoyant low-salinity marshes with low-density organic soils often occurs during hurricanes. The Caernarvon river diversion structure is presently being oper-

ated to the maximum extent possible to enhance marsh recovery in the most heavily affected area. Initial observations indicate substantial marsh recovery.

カトリーナとリタは広大な沿岸湿地帯に5~10cmの堆積物を残した(11)。しかし、台風の進路にあるブレトンサウンド地域の約100km²の湿地は開水域に変わった。この地域の中には深さ1m以上というところもあるが、被災地のほとんどは、嵐で根こそぎにされた様々な湿地の茂みが散在する浅い干潟である。有機土壌の少ない汽水域湿地の環境は、ハリケーンによってたびたび攪乱される。現在は、カーナボン川の転流施設は、最もひどい被害を受けた地域の湿地環境の回復を促すために運転されている。今のところ、回復はかなり進んでいる。

Hurricane Rita made landfall near Sabine Pass at the Louisiana-Texas border on 24 September 2005, generating a storm surge of up to 5 m (Fig. 3) and reflooding parts of New Orleans more than 200 km east of landfall. Coastal communities in Cameron Parish were destroyed, and parts of the city of Lake Charles experienced 2-to-3-m-deep flooding associated with surge propagating up a ship channel. To the east, the 30-to-50-km-wide Chenier Plain wetlands reduced surge inland. Because of the lesser storm surge and lower population densities, fewer than 10 people lost their lives directly as a result of Rita's winds and surge. Rita's surge displaced residents from all Louisiana coastal parishes, however, and drove salt water tens of kilometers inland, killing freshwater wetlands in artificially impounded areas (25).

ハリケーン・リタは2005年9月24日、ルイジアナとテキサスの州境のサビンパス付近に上陸し、最大5mの高潮によって(図3)、上陸地点から東へ200キロ以上にわたってニューオーリンズを再び冠水させた。カメロン郡の沿岸部地域は壊滅的打撃を受け、レイクチャールズ市では船舶用水路で増幅された高潮のため2~3メートルの浸水したところがあった。東方では、幅30~50キロのシェニエ平原の湿地により内陸部の高潮が抑えられた。高潮が少なく人口密度も低かったことから、リタの暴風や高潮による死者は10人以下だった。しかし、高潮によりルイジアナ沿岸部の郡の住民は全員避難し、内陸部数十kmにわたり塩水が入り込んだため、人工貯水域の淡水湿地が損なわれた(25)。

Hurricane Rita's highest storm surge was nearly as great as the surge confronting the eastern side of New Orleans during Katrina, but had to cross 30 to 50 km of Chenier Plain wetlands before reaching main population centers, whereas Katrina's surge was less **impeded** as it traveled through large lagoons, degraded wetlands, and artificial channels. Barrier islands, shoals, and wetlands can reduce storm surge and waves, but the full range of these effects is not well captured at present by most numerical models. Although it has been shown that damage from the 2004 Indian Ocean tsunami was less in communities sheltered by intact mangroves (26), the existence of an extensive barrier island system off of the Mississippi coast did not protect it from a 10-m surge during Katrina. Observations of water levels indicate that Rita's surge was **attenuated** at an average rate of 4.7 cm per kilometer of wetland landscape where channels were not present. This is similar to previous hurricanes, including Hurricane Andrew in 1992, indicating storm surge attenuation of 7.9 cm per kilometer for intact wetlands along the central Louisiana coast (27-29).

ハリケーン・リタの最大高潮は、カトリーナの時にニューオーリンズ東部を直撃した高潮にほぼ匹敵するものだった。しかし、カトリーナの場合は広大な潟湖、荒廃した湿地帯、人口水路を通過したため遮るものがあまりなかったが、リタではシェニエ平原の湿地帯30~50キロを横断してか

ら人口集中地域に達した。防波島、砂州、湿地は高潮や波を抑えることができるが、こうした効果についてほとんどの数値モデルはまだ十分総合的に捕捉していない。2004年のインド洋津波による被害は自然のマングローブに守られた地域ではさほどではなかったことが分かっているが(26)、ミシシッピー沿岸から離れた広範囲の防波島システムがあってもカトリーナの時は10mの高波から守ることはできなかった。水位を観察したところ、リタの高潮は水路のない湿地帯についてはkm当たり平均4.7cmの速さで減衰した。これは、ルイジアナ沿岸部の中心にそった自然湿地についてkm当たり7.9cmの高潮減衰が認められた1992年のハリケーン・アンドリューなど、過去のハリケーンに似ている(27-29)。

Emergent canopies of forested wetlands can greatly diminish wind penetration, thereby reducing the wind stress available to generate surface waves as well as storm surge (30, 31). The sheltering effect of these canopied areas also affects the fetch over which wave development takes place. Shallow water depths **attenuate** waves via bottom friction and breaking, whereas vegetation provides additional frictional drag and wave **attenuation** (32) and also limits static wave setup (33). Extracting energy from waves either by breaking or increased drag reduces destructive wave action on levees. During Katrina, wave-induced run-up and overtopping washed away many miles of turf-covered earthen levees along the MRGO (24). Few wetlands or fast lands protected these levees from high-energy surge currents and waves that broke on the levee face. Conversely, other earthen levees nearby that were overtopped by the low-velocity surge, but fronted by extensive wetlands, escaped substantial damage (34).

森林湿地による緊急の天蓋(林冠、キャノピー)が、防風に役立ち、それにより水面波や高潮を生み出す風応力を低減させる(30, 31)。こうしたキャノピー地域のシェルター効果は波浪発達が生じる広がりにも影響を与える。水深が浅ければ水底との摩擦で波が減衰し壊れる一方、植生がさらに摩擦抵抗と波浪減衰を促し(32)定常波の生成も抑える(33)。砕波や粗度増大により波からエネルギーを取り除くことで堤防への破壊的な波の作用を抑える。カトリーナの時は、高波と越流がMRGOにそった何マイルもの芝で被覆した土手の堤防を洗い流した(24)。堤防法面を破壊した高波による流れや波浪から、わずかな湿地や促成地が堤防を守っていた。逆に、広大な湿地帯があった近隣の別の土堤では、高波が越流しても流速は遅く、堤防は大きな被害を免れた(34)。

Depending on the rate of RSLR, coastal wetlands maintain a near-sea-level elevation by trapping sediments and forming organic-rich soils. Thus, wetlands play an important role in maintaining elevations near sea level, in contrast to the -3 to -4m elevations that characterize the equilibrium depth of large bays along the Louisiana coast. Although the relative effects of shallow open waters versus intertidal wetlands on both waves and storm surges from strong hurricanes remain to be fully resolved, it is clear that the intact barrier islands, wetlands, and ridges that once characterized the coastal landscape of Louisiana afforded substantial protection to New Orleans and other coastal communities that cannot be depended on today and must be replaced by more massive levees.

RSLRのペースに応じて、沿岸部湿地は堆積物を取り込み有機物の豊富な土壌を形成して、ほぼ海抜レベルの高度を保っている。このように湿地帯は、ほぼ海抜レベルの土地の高度を保つうえで重要な役割を担っており、ルイジアナ沿岸の広大な各湾の平衡深度の特徴である-3~4メートルとなっている土地とは対照的である。浅い開水域と潮間帯の湿地が強力なハリケーンによる波浪と高潮に対して持っている効果はまだ十分解明されていないが、かつてルイジアナ沿岸部の地形の特徴であった自然防波島、湿地、砂浜は、ニューオーリンズやその他の沿岸集落の実質的な保護機能を

持っていたが、今日では期待することはできず、さらに強大な堤防に依らざるを得なくなっている。

Consequently, maintaining and, where possible, using deltaic processes to increase the area of marshes, mangroves, and swamps in strategic locations would provide a self-sustaining complement to the structural protection of levees. Unfortunately, the physical and hydro-logic integrity of the wetlands southeast of New Orleans has been greatly compromised by large navigation channels, which may now also require elaborate gates and other closure structures.

結果的に、湿地、マングローブ、沼地を戦略的に配置した地域を広げるための三角州形成プロセスを維持し、可能であれば活用することが、堤防の構造的保護を自立的に補強する手段となるだろう。残念ながら、ニューオーリンズ南東部の湿地の物理的、水文学的整合性は大規模な航行水路によりかなり損なわれていることから、今では精巧な水門その他の閉鎖構造物も必要になる。

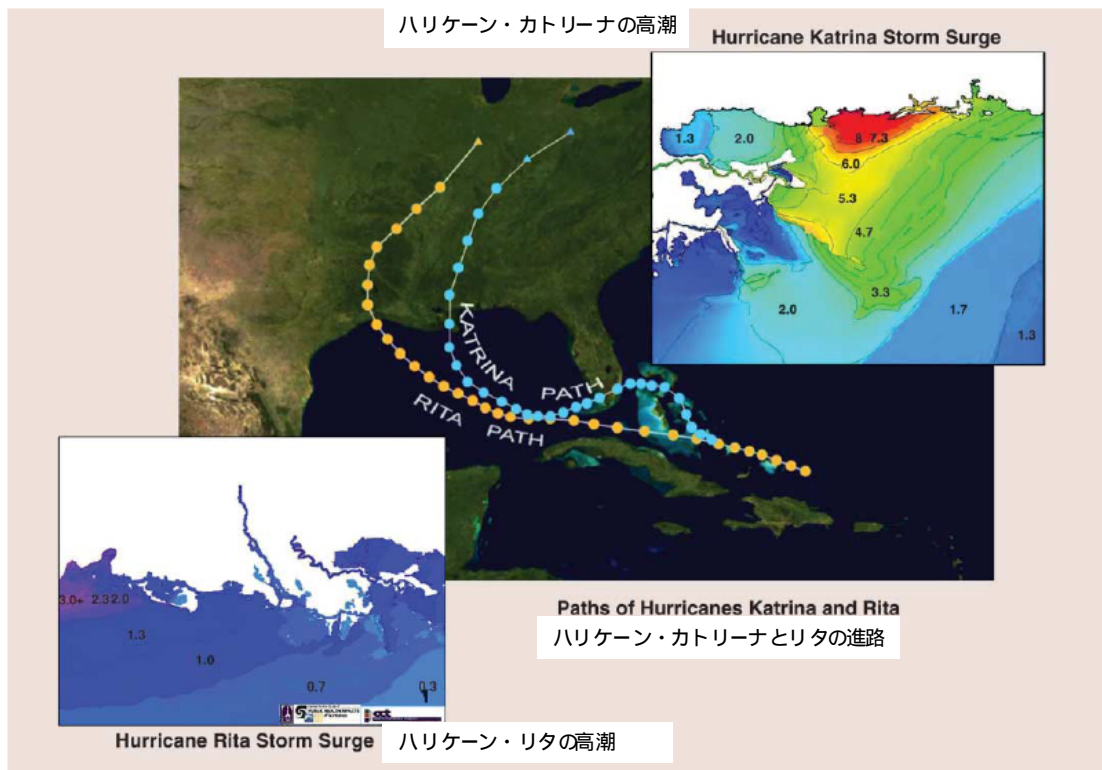


Fig. 3. A composite figure showing paths of Hurricanes Katrina and Rita, surge levels [in meters, as estimated by the ADCIRC model (67)], areas flooded, sites of levee failures, and wetland loss due to the hurricane.

図3 ハリケーン・カトリーナとリタの進路、高潮水位（メートル単位、ADCIRC モデル推算(67)）、被災地、堤防決壊場所、ハリケーンによる湿地消失を表示した合成図

The Evolving MDP Restoration Effort

Planning the restoration of the coastal landscape requires the design of sustainable ecosystems that integrate human society with the natural environment (35–37) and work with rather than against natural processes. Such ecological engineering approaches rely primarily on the energies of nature, with human energy being used in the design and control of key processes. Because of the dimensions of the delta's problems, traditional engineering approaches such as levee construction and the placing of dredged sediments are also required. An important goal of MDP restoration is the application of the optimum mix of ecological and standard engineering approaches. With this in mind, four general approaches to restoration are being evaluated, planned, or implemented in the MDP:

進展する MDP 再生活動

沿岸部の景観を再生する計画には人間社会と自然環境と統合させる持続可能な生態系を設計し (35 - 37)、自然のプロセスに対抗するのではなくむしろ協力する必要がある。そうした生態工学的なアプローチは主に自然のエネルギーに依拠し、人間のエネルギーは基本プロセスの設計と制御に使われる。三角洲の問題の特徴ゆえに、堤防の建設や浚渫堆積物の配置といった従来の工学的アプローチも必要である。MDP 再生の重要な目標は生態工学的アプローチと標準工学的アプローチをうまく組み合わせて応用することである。これを念頭に、MDP では、4 つの基本的な再生アプローチについて、評価、計画、実施を進めている：

(1) Reconnecting the river to the deltaic plain via river reintroductions, the reopening of old distributaries, and crevasse-splay development (35, 37, 38). Over the past two decades, it has become increasingly clear that this will have to be done on a large scale.

(1) 河道の再導入、旧分流の通水、無堤部からの氾濫により河川をデルタ平原に再接続する (35, 37, 38)。この 20 年で、大規模のこのアプローチを進めなければならないことがますます明らかになってきた。

(2) Using dredged sediments to create and restore wetlands by pumping them over distances of tens of kilometers. This is expensive, but because dredged sediments can be used to create wetlands quickly, this technique may be useful for restoring wetlands that would soon be lost or quickly creating large areas of wetlands that would then be sustained through river reintroductions (39).

(2) 浚渫堆積物を使ってそれを何十キロ長にも渡り押し広げ、湿地を創出修復させる。予算のかかる技術だが、速やかに湿地を作り出すことができることから、消失しつつある湿地の再生や、河道再導入による広範囲の湿地の維持に有用だろう (39)。

(3) Restoring barrier islands by pumping sands from offshore, constructing groins and breakwaters, placing riprap, and using fences and plantings to stabilize sand dunes (40, 41). Because MDP barrier islands do not just migrate but deteriorate over time, restoration will require ongoing maintenance. Restoration and maintenance can be justified, however, because islands reduce waves and storm surge and provide important habitats in the coastal landscape. In the future, the remobilization of sand trapped in up-basin reservoirs may become a source of coarse sediments that will aid in maintaining barrier islands.

(3) 沖合から砂を浚渫して防波島を再生し、突堤や離岸堤を造り、捨て石を置いて、砂丘を安定させる柵や植林を活用する (40, 41)。MDP の防波島は移動するだけでなく徐々に荒廃していくこ

とから、修復には継続的な保全が必要となる。しかし、防波島により波浪や高潮が抑えられ、沿岸地域の重要な生息地となることから、修復と保全は妥当である。今後は、上部盆地の貯水池の堆積土砂の再利用が防波島保全のための粗い堆積物の供給源となる可能性がある。

(4) Restoring hydrological processes by removing spoil banks, backfilling canals, closing deep navigation channels (such as the MRGO), installing locks (42), trapping sediments (43), and protecting interior shorelines against erosion. Such restoration generally affects a relatively small area, but can be particularly effective if done in conjunction with diversions so that river water is used most effectively.

(4) 邪魔な堤防を移動させ、運河を埋め戻し、深い航行水路（MRGO など）を閉鎖し、水門を設置し（42）堆積物を捕捉し（43）内陸の海岸線を侵食から保護することにより水文学的プロセスを再生させる。こうした修復は一般にかなり地域限定的なものとなるが、河川流を最も効果的に使えるように転流施設と併せて行くと特に効果がある。

Even with its bountiful natural resources, it must be remembered that the MDP is a “working coast” (38, 44), and restoration must be integrated with navigation and flood-protection infrastructure, agriculture, urban development, commercial and recreational fishing, and oil and gas production. In turn, these activities will have to adapt to projects, such as diversions, that seek to return the delta to a more natural state. This is a lesson to be learned regarding most deltas.

自然の営力を多く用いるとしても、MDP は利用されている沿岸域であり（38, 44）航行や洪水防止施設、農業、都市開発、商業的漁業やレクリエーションとしての釣り、石油ガス生産などと統合して修復を進めなければならないことを忘れてはならない。ひいては、こうした活動を、三角州をより自然な状態に戻そうという転流施設などの事業に適用させなければならない。これはほとんどの三角州地帯に関して得るべき教訓である。

Coastal restoration will be more effective if it takes into account changes in fresh water supply, suspended sediment, and nutrient fluxes in the Mississippi River Basin (45, 46). It should work cooperatively with efforts to better manage and restore the resources and environments of the basin, including the restoration of the Missouri and Upper Mississippi Rivers, reservoir management, the reconnection of wetlands and flood plains, and reducing loadings of nutrients from agricultural lands that result in hypoxia in the Gulf of Mexico (47–49).

沿岸部の再生は、ミシシッピ川流域の淡水資源供給、懸濁堆積物、養分フラックスの変化を考慮に入れるとより効果が上がるだろう（45, 46）。ミゾーリ川とミシシッピ川上流の環境復元、貯水池管理、湿地と氾濫原の再接続、メキシコ湾で低酸素症を発症させる農地からの栄養付加の削減など、流域の資源と環境をより上手く管理再生する活動と併せて進めるべきである（47 - 49）。

Global climate change and the availability and cost of energy have important implications for delta restoration (50). Accelerated sea-level rise, changes in precipitation patterns, and changes in the frequency and intensity of hurricanes (51–54) must be taken into account in designing effective restoration strategies. Less energy-intensive restoration techniques that use the energies of nature, rather than dwindling and costly fossil fuels (55, 47), should be emphasized (50).

世界的な気候変動とエネルギーの利用可能性とコストはデルタ再生に重要な影響がある(50)。海面上昇の加速、降雨パターンの変化、ハリケーンの頻度と強度の変化(51 - 54)を効果的な再生戦略の設計に当たり考慮しなければならない。先細り状態の金のかかる化石燃料ではなく自然エネルギーを使うエネルギー集約度のさほど高くない再生(55, 47)を重視すべきである(50)。

A New Institutional Framework

For most of the 20th century, public decisions and investments in coastal Louisiana focused on flood protection, navigation, oil and gas extraction, or wildlife management. Growing awareness of the dimensions and consequences of wetland loss has resulted in considerable regional advocacy and planning for substantial public investments for restoration of the MDP. The federal Coastal Wetlands, Planning, Protection and Restoration Act (CWPPRA) of 1990 has provided up to \$50 million per year in the United States, but it became apparent that larger-scale restoration efforts were needed (56). A more inclusive ecosystem restoration plan, “Coast 2050—Toward a Sustainable Coastal Louisiana” was developed in 1998, which included a diverse amalgamation of projects of various sizes and purposes located throughout the coastal zone (57).

新しい制度的枠組み

20世紀は概ね、ルイジアナ沿岸部における公的決定と投資は、洪水防止、航行、石油ガス採取、あるいは野生動物の管理に集中していた。湿地消失の特徴とその影響に対する意識が高まり、MDP再生に向けた相当な公的投資を求める地域の推進活動や計画が重要視されてきた。連邦政府の1990年沿岸湿地計画保護修復法(CWPPRA)により国内で年間最大5000万ドルが支出されたが、より大規模な修復活動が必要になった(56)。より包括的な生態系再生計画である「Coast 2050 - 持続可能なルイジアナ沿岸部に向けて」が1998年に策定され、ここで沿岸区域全体に配された様々な規模と目的の多様な事業が扱われた(57)。

To further refine the Coast 2050 Plan, the U.S. Army Corps of Engineers undertook the Louisiana Coastal Area (LCA) Ecosystem Restoration Study (58). The LCA Study produced detailed quantitative analyses of various restoration features and of the cost and effectiveness of suites of various features in achieving ecosystem benefits, ranging in total cost from \$5 billion to 17 billion. The Office of Management and Budget directed the Corps to prepare a scaled-back LCA Plan that was submitted to Congress in January 2005 (38). It recommended authorization of five “near-term critical ecosystem restoration features,” a science and technology program, a demonstration program, beneficial use of dredged materials, and further investigations of other near-term restoration features, at a cost of nearly \$2 billion. The Assistant Secretary of the Army requested programmatic authorization for elements totaling \$1.12 billion, which currently awaits passage of a Water Resources Development Act or some other statute.

Coast 2050 プランをさらに詰めるために、米国陸軍工兵隊はルイジアナ沿岸地域(LCA)生態系回復調査(58)にとりかかった。LCA調査により、様々な回復策の特徴や生態系の便益を達成する上での様々な活動の費用効果に関する詳細な定量分析が行われ、総費用は50億ドルから170億ドルと算出された。行政管理予算局は工兵隊に規模を抑えたLCAプランの作成を指示し、これが2005年1月に議会に提出された(38)。ここでは、5つの「短期重点生態系回復活動」、科学技術プログラム、実証プログラム、浚渫材料の利便的活用、そして約20億ドルの、その他の短期回

復活動に関する詳しい調査の承認を提言していた。陸軍次官補が計 11 億 2,000 万ドルの各活動に関わるプログラムの承認を求めた。目下、水資源開発法その他の法律の成立待ちである。

A National Research Council review of the LCA Plan concluded: “although the individual projects in the study are scientifically sound, there should be more and larger scale projects that provide a comprehensive approach to addressing land loss over such a large area. More importantly, the study should be guided by a detailed map of the expected future landscape of coastal Louisiana that is developed from agreed upon goals for the region and the nation.” (59, 60). Congress directed the Corps to develop a plan for closure of the MRGO to deep-draft navigation, and in December 2006 the Corps recommended that the channel be permanently blocked and not maintained even for shallow-draft navigation.

米国学術研究会議は LCA プランを検討して次のような結論を出した。「調査の個々のプロジェクトは科学的に見て健全なものだが、これほど膨大な地域の土地消失に対応するには包括的なアプローチとなる、より多くのより大規模なプロジェクトが必要である。さらに重要なことは、この調査は、該当地域や国家にとって、合意した目標をもとに考案した、ルイジアナ沿岸部について想定する将来の景観に関する詳細な地図を指針として進めなければならない(59,60)。議会は工兵隊に、深喫水航行を行う MRGO を閉鎖する計画の作成を指示し、工兵隊は 2006 年 12 月に水路を恒久的に閉鎖し浅喫水航行への使用禁止することを提言した。

Before the hurricanes of 2005, planning and decision-making for delta restoration remained largely separate from that for storm protection and navigation (33). In LCA planning, restoration features were evaluated on the basis of ecosystem benefits and financial costs, so that the most cost-effective array of features could be identified. Benefits did not specifically include the value of storm damage reduction, and costs were only financial outlays by governments, even though the features might impose costs or yield benefits to current ecosystem users (such as fishers and oil and gas and navigation interests). These analytical limitations effectively isolated restoration plan formulation from other potential synergies or conflicts with flood protection, storm damage reduction, and navigation.

2005 年のハリケーン前は、デルタ再生に関する計画と決定は、概ね暴風雨からの保護と航行関連のものとして扱われていた(33)。LCA の計画立案にあたっては、復元活動が生態系の便益と金銭的費用をもとに評価され、それにより最もコスト効率のよい活動を特定できるようにしている。便益には具体的に、暴風雨の被害軽減の価値は含まれておらず、そうした活動には費用がかかるとか現在の生態系利用者(漁師や石油ガス、航行関連)に便益をもたらす可能性があるとしても、コスト面では政府による財務経費しか扱われなかった。こうした分析上の限界から、復元計画の作成は、洪水防止、暴風雨の被害軽減、航行その他との、潜在的な相乗効果や相反作用と切り離されてしまっていた。

It has become clear not only to scientists and engineers (38) but also to a growing segment of the public and political leadership that sustaining a coastal landscape is necessary to ensure the habitability and economic enterprises of the MDP (61, 37). The implications of this new awareness are twofold: First, activities that could further diminish the coastal landscape have to be adjusted so that they are consistent with that sustainability; and second, ecosystem restoration efforts must now include storm damage reduction benefits as a major consideration in the overall restoration plan (38). In the aftermath of the 2005 hurricanes, the Louisiana

Legislature created the Louisiana Coastal Protection and Restoration Authority and Congress directed the Corps to undertake the 2-year Louisiana Coastal Protection and Restoration Project (LACPR) in order to identify, describe, and propose a full range of flood control, coastal restoration, and hurricane protection measures for south Louisiana. At this point, the preliminary LACPR report and the preliminary draft State Master Plan (61) deal predominantly with hurricane protection barriers, including coastwise levees with floodgates that could diminish the sustainability of the coastal landscape. Much remains to be done to integrate hurricane protection and coastal ecosystem restoration in a compatible manner.

沿岸部の景観を保つことが MDP の生息可能性や経済事業を確保するために必要であることは (61, 37) 科学者やエンジニア (38) のみならず、関心を高めた公的、政治的な指導層にとっても明らかになってきた。この新たな認識には二つの意味合いがある。第一に、沿岸景観をさらに損ないかねない活動を調整して持続可能性と適合させなければならないこと。第二に、これからの生態系回復活動には全体計画の中心的な考慮事項として暴風雨災害の軽減を入れなければならないことである (38)。2005 年のハリケーン直後、ルイジアナ議会はルイジアナ沿岸保護回復管理局 (Louisiana Coastal Protection and Restoration Authority) を創設し、議会は工兵隊に、ルイジアナ南部について総合的な洪水防止、沿岸部再生、ハリケーン保護策を特定、記述、提案するために、2 年間のルイジアナ沿岸保護回復プロジェクト (LACPR) に着手するよう指示した。この時点で、LACPR の予備報告書と州全体計画の素案 (61) では大部分が、沿岸部景観の持続可能性を損ないかねない水門 (防潮門) を設けた沿岸の堤防などの、ハリケーン防止バリアについて扱っている。ハリケーン防止と沿岸部生態系回復を共存可能な形で統合するためになすべきことはまだ多い。

Nonetheless, the 2005 hurricanes have also given new impetus to more comprehensive and aggressive coastal ecosystem restoration approaches than those included in the 2005 LCA Plan proposed to Congress. These include larger scale diversions, the long-distance conveyance of sediment slurries, and reengineering of the navigational access at the mouth of the Mississippi River so that more of the sediment load of the river is retained in the nearshore zone to contribute to constructive and sustaining deltaic processes. Furthermore, the damage wrought by the hurricanes has lessened some previous social obstacles to these more aggressive approaches by forcing relocation away from the coast, causing losses of resources and/or infrastructure, and lowering public tolerance for obstructions by narrow interests. All of this is evidence that there is a growing recognition that delta restoration and hurricane protection will demand a suite of activities that are much greater in scale and more profound than those considered barely a decade ago.

それでも、2005 年のハリケーンは、議会に提案された 2005 年度の LCA プランで扱っていたものよりも、総合的かつ積極的な沿岸部生態系回復アプローチに進む新たな勢いを与えることとなった。例えば、より規模の大きな転流、堆積物スラリーの長距離搬送、ミシシッピー川河口での船舶の出入りの見直しなどが扱われており、河川の堆積量をもっと沿岸区域に確保するように建設して、持続的な三角州形成プロセスを促すようにする。さらに、ハリケーンによってもたらされた被害により、沿岸部からの移転強制、資源およびまたはインフラの消失、私利私欲による障害物に対する社会の寛容度の低下、こうしたより積極的なアプローチに対する一部以前にあった社会的障害が減ることとなった。このどれもが、デルタ再生とハリケーン防止には、ほんの 10 年前に考えられていたものより規模の大きな、より総合的な活動が必要であるという認識が高まりつつある証拠である。

The Gulf of Mexico Energy Security Act, signed into law in December 2006, gives Louisiana and other Gulf Coast states 37% of the revenues from newly opened oil and gas tracts. Louisiana has constitutionally dedicated these revenues to coastal restoration and protection. Along with other anticipated revenue streams, this could provide approximately \$1 billion per year over 30 years for these purposes. Consequently, the state may have the resources to pursue coastal ecosystem restoration on a scale larger than any other U.S. region. This poses a major challenge to science and science-based planning to develop the most strategic and effective strategies, while minimizing the conflicts and maximizing the synergies in achieving multiple social objectives within a sustainable coastal landscape required for the future of the region. At the same time, the substantial uncertainties must be recognized, accepted, and incrementally reduced through adaptive management approaches that promote learning while executing and enhancing the effectiveness of future decisions—for this must truly be a long-term commitment. That will require substantial improvements in science, engineering, planning, and management capacity, operating with a sense of urgency and purpose.

メキシコ湾エネルギー保障法 (Gulf of Mexico Energy Security Act) が 2006 年 12 月に成立し、ルイジアナ及びその他のメキシコ湾岸沿岸州に、新たに開設された石油ガス地帯からの収益の 37% が付与される。ルイジアナは法に基づきこうした収益を沿岸部の再生と保護に投じてきた。その他の予想財源とあわせ、これにより上記の目的について 30 年に渡り年間約 10 億ドルが支給される可能性がある。その結果、同州はどの国内地域よりも規模の大きな沿岸部生態系復元を進める財源を手に入れる可能性がある。これは地域の将来に必要な持続可能な沿岸部景観に関わる複数の社会的目的を達成するうえでの対立を最小限に抑え、最大限の相乗効果をあげながら、最も戦略的かつ効果的な戦略を策定するための科学と科学に基づくプランニングにとって大きな問題を提起している。同時に、相当な不確実性を認識、容認し、実践し将来の決定の有効性を高めつつ、学習を促すような調整型の管理アプローチを採用して徐々に削減していかなければならない。というのも、これは間違いなく長丁場の仕事になるからだ。それには、科学、エンジニアリング、プランニング、管理能力の相当な改善と、切迫感と目的意識を持った運用が必要となる。

The restoration of the MDP is important not only in its own right, but because it provides understanding needed to contend with the many other deteriorating delta systems around the world. Moreover, it serves as a model for adaptation to future climate change in coastal ecosystems more generally. Because of high rates of subsidence, the MDP presently has a rate of relative sea-level rise equivalent to that predicted for many coasts toward the end of this century. Human impacts have caused both substantial increases and decreases in freshwater inflow to parts of the coast. And the area has one of the highest frequencies of tropical cyclone impacts in the world. The management approaches developed to restore and sustain the MDP in the face of present-day forces will undoubtedly influence future adaptation to climate change impacts elsewhere, especially during a period of resource scarcity. In addition, the experience in the MDP indicates that restoration on such large scales requires long time periods and complex stakeholder engagement.

MDP 再生はそれ自体が重要なだけでなく、世界中のその他多くの荒廃したデルタ地帯に取り組むために必要な理解を得るために重要である。この活動はまた、より一般的に沿岸部の生態系の今後の気候変動に対する適応モデルとなる。地盤沈下が激しいことから、MDP は現在今世紀末にかけ多くの沿岸部について予想されている相対的の海面上昇率に直面する。人為的影響が一部沿岸部

への淡水流入の相当な増減を左右してきた。そして、この地域は世界でも熱帯低気圧の影響を最も多く受けている地域の一つである。特に資源が稀少な時代にあっては、現代のエネルギーを前にMDPを再生維持するために開発された管理アプローチは明らかに他地域における気候変動の影響に対する今後の適応に影響を与えるだろう。さらに、MDPにおける経験から、こうした大規模な再生活動には長い期間と込み入った関係者の関与が必要である。

References and Notes

- 1 H. N. Fisk, E. McFarlan, C. Kolb, J. Wilbert, *J. Sed. Petrol.* 24, 76 (1954).
- 2 R. Saucier, *Geomorphology and Quaternary Geologic History of the Lower Mississippi Valley* (U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, 1994), vol. 1.
- 3 H. H. Roberts, *J. Coastal Res.* 13, 605 (1997).
- 4 J. W. Day Jr., J. F. Martin, L. Cardoch, P.H. Templet, *Coastal Manage.* 25, 115 (1997).
- 5 J. Wells, J. Coleman, *Estuar. Coastal Shelf Sci.* 25, 111 (1987).
- 6 R. H. Keesel, *Environ. Geol. Water Sci.* 13, 183 (1989).
- 7 D. Cahoon, D. Reed, J. Day Jr., *Mar. Geol.* 128, 1 (1995).
- 8 I. A. Mendelsohn, J. T. Morris, in *Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology*, M. P. Weinstein, D. A. Kreeger, Eds. (Kluwer Academic, Boston, 2000), pp. 59–80.
- 9 R. D. DeLaune, S. R. Pezeshki, *Water Air Soil Pollut.* 3, 167 (2003).
- 10 R. H. Baumann, J. W. Day Jr., C. A. Miller, *Science* 224, 1093 (1984).
- 11 R. E. Turner, J. J. Boustian, E. M. Swenson, J. S. Spicer, *Science* 314, 449 (2006).
- 12 J. M. Coleman, H. H. Roberts, G. W. Stone, *J. Coastal Res.* 14, 698 (1998).
- 13 S. Penland, R. Boyd, J. Suter, *J. Sed. Petrol.* 58, 932 (1988).
- 14 L. Britsch, J. Dunbar, *J. Coastal Res.* 9, 324 (1993).
- 15 S. Gagliano, K. Meyer-Arendt, K. Wicker, *Trans. Gulf Coast. Assoc. Geol. Soc. Trans.* 31, 295 (1981).
- 16 L. Britsch, J. Dunbar, *J. Coastal Res.* 9, 324 (1993).
- 17 J. W. Day Jr. et al., *Estuaries* 23, 425 (2000).
- 18 J. A. Barras, P. E. Bourgeois, L. R. Handley, *Landloss in Coastal Louisiana: 1956-90* (Open File Report 94-01, National Biological Survey, National Wetlands Research Center, Lafayette, LA, 1994).
- 19 D. F. Boesch et al., *J. Coastal Res.*, Special Issue 20 (1994).
- 20 R. H. Day, R. K. Hdz, J. W. Day Jr., *Environ. Manage.* 14, 229 (1990).
- 21 E. M. Swenson, R. E. Turner, *Estuar. Coastal Shelf Sci.* 24, 599 (1987).
- 22 R. A. Marton, N. A. Bster, M. D. Krohn, *Gulf Coast Assoc. Geol. Soc. Trans.* 52, 767 (2002).
- 23 W. Conner, J. Day, R. Baumann, J. Randall, *Wetlands Ecol. Manage.* 1, 45 (1989).
- 24 Interagency Performance Evaluation Task Force, *Performance Evaluation of the New Orleans and Southeast Louisiana Hurricane Protection System* (MMTF 00038-06, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS, 2006).
- 25 National Wetlands Research Center, U.S. Geological Survey (www.nwrc.usgs.gov/hurricanekatrina.htm).
- 26 F. Danielsen et al., *Science* 310, 643 (2005).
- 27 J. K. Lovelace, *Storm-tide Elevations Produced by Hurricane Andrew along the Louisiana Coast*, August 25-27, 1992 (Open File Report 94371, U.S. Geological Survey, Baton Rouge, LA, 1994).
- 28 E. M. Swenson, *Hurricane Andrew: the Inundation of the Louisiana Coastal Marshes* (Department of Natural Resources

- contract no. 256081-95-02, report to the Louisiana Department of Natural Resources, Baton Rouge, LA, 1994).
- 29 U. S. Army Corps of Engineers, Hurricane Study for Morgan City, Louisiana and Vicinity, New Orleans District (U.S. Army Corps of Engineers, New Orleans, LA, 1963).
 - 30 R. O. Reid, R. E. Whitaker, J. Waterway J. Waterways Harbors Coastal Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng. WW1, 61 (1976).
 - 31 M. R. Raupach, A. S. Thom, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 13, 97 (1981).
 - 32 E. W. Koch, G. Gust, *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 184, 63 (1999).
 - 33 R. G. Dean, C. J. Bender, *Coastal Eng.* 53, 149 (2006). 34. H. S. Mashriqui et al., in *Coastal Hydrology and Water Quality: Proceedings of the AIH 25th Anniversary Meeting and International Conference*, Y. J. Xu, V. J. Singh, Eds. (American Institute of Hydrology, Baton Rouge, LA, 2006), pp. 481–489.
 - 35 W. J. Mitsch, S. E. Jørgensen, Eds, *Ecological Engineering and Ecosystem Restoration* (Wiley, New York, 2003).
 - 36 S. Laska *Nat. Haz. Observer* 31, 2 (2006).
 - 37 R. Costanza, W. J. Mitsch, J. W. Day Jr., *Front. Ecol. Environ.* 4, 465 (2006).
 - 38 D. Boesch et al., *A New Framework for Planning the Future of Coastal Louisiana after the Hurricanes of 2005* (Univ. of Maryland Center for Environmental Science, Cambridge, MD, 2006).
 - 39 I. A. Mendelssohn, N. L. Kuhn, *Ecol. Eng.* 21, 115 (2003).
 - 40 I. A. Mendelssohn, M. W. Hester, F. J. Monteferrante, *J. Coastal Res.* 7, 137 (1991).
 - 41 G. W. Stone, R. A. McBride, *J. Coastal Res.* 14, 900 (1998).
 - 42 R. E. Turner, B. Streever, *Approaches to Coastal Wetland Restoration: Northern Gulf of Mexico* (SPB Academic Publishing The Hague, Netherlands, 2002).
 - 43 R. M. J. Boumans, J. W. Day Jr., G. P. Kemp, K. Kilgen, *Ecol. Eng.* 9, 37 (1997).
 - 44 R. Gramling, R. Hagelman, *J. Coastal Res.* SI44, 112 (2005).
 - 45 N. N. Rabalais et al., *Estuaries* 17, 850 (1994).
 - 46 W. Mitsch et al., *BioScience* 51, 373 (2001).
 - 47 C. Hall, P. Tharakan, J. Hallock, C. Cleveland, M. Jefferson, *Nature* 426, 318 (2003).
 - 48 J. Day et al., *Biotechnol. Adv.* 22, 135 (2003).
 - 49 W. Mitsch, J. Day, *Ecol. Eng.* 26, 55 (2006).
 - 50 J. Day et al., *Ecol. Eng.* 24, 253 (2005).
 - 51 Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report* (Cambridge Univ Press, Cambridge, 2001).
 - 52 P. J. Webster, G. J. Holland, J. A. Curry, H.-R. Chang, *Science* 309, 1844 (2005).
 - 53 K. Emanuel, *Nature* 436, 686 (2005).
 - 54 C. D. Hoyos, P. A. Agudelo, P. J. Webster, J. A. Curry, *Science* 312, 94 (2006).
 - 55 K. S. Deffeyes, *Hulbert's Peak: The Impending World Oil Shortage* (Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 2001).
 - 56 *Coastal Wetlands Planning, Protection, and Restoration Act, A Response to Louisiana's Land Loss* (2006) (www.lacoast.gov/reports/program/program.asp?r=16809).
 - 57 Louisiana Wetlands Conservation and Restoration Task Force, *Coast 2050: Toward a Sustainable Coastal Louisiana* (1998) (www.lcagov/net_prod_download/public/lca_net_pub_products/doc/2050report.pdf).
 - 58 U. S. Army Corps of Engineers. Louisiana Coastal Area, Louisiana Ecosystem Restoration Study (2004) (http://data.lcagov/Ivan6/main/main_report_dl.pdf).
 - 59 National Research Council, *Drawing Louisiana's New Map: Addressing Land Loss in Coastal Louisiana* (National Academies Press, Washington, DC, 2005).
 - 60 Although the National Research Council report (59) called for a detailed map of expected coastal restoration projects, there is no single agreed-on map of the coastal restoration plan. Rather, a series of maps and plans have been produced over the

past 10 to 15 years that depict the evolution of thinking about restoration. The reader is directed to several reports and Web sites describing the evolving coastal restoration effort. These include the CWPPRA programs (56), the Coast 2050 program (57), the LCA project (58), and the Louisiana Comprehensive Coastal Protection Master Plan for Louisiana (62). Two plans have been released for closure of the Mississippi River Gulf Outlet: one by the U.S. Army Corps of Engineers (63) and a second by a group of scientists and environmental groups (64). A group of forested wetland ecologists documented the loss of coastal forested wetlands and discussed management options to sustain these forests (65). Costanza et al. (37) provided a series of principles to guide efforts for hurricane protection and delta restoration.

61. S. Laska et al., *J. Coastal Res. Spec. Iss.* 44, 90 (2005).

62. Coastal Protection and Restoration Authority, *Comprehensive Coastal Protection Master Plan for Louisiana* (2006) (www.louisianacoastalplanning.org/documents/Comprehensive%20Coastal%20Protection%20Master%20Plan%20for%20Louisiana%20-%20Preliminary%20Draft.pdf).

63. U. S. Army Corps of Engineers Mississippi River Gulf Outlet Deep-Draft De-Authorization (Interim Report to Congress, 2006) (www.mvn.usace.armymil/pao/RELEASES/MRGO_Report_Congress_061214_Final.pdf).

64. Lake Pontchartrain Basin Foundation, *Unified Deauthorization Plan Report* (2006) (www.saveourlake.org/wetlands.htm).

65. Coastal Wetland Forests Conservation and Use Science Working Group, *Conservation, Protection and Utilization of Louisiana's Coastal Wetland Forests* (Final Report to the Governor of Louisiana, 2005) (www.coastalforests.wg.lsu.edu/SWG_FinalReport.pdf).

66. C. R. Kolb, J. R. Van Lopik, in M. L. Shirley, Ed., *Deltas in Their Geological Framework*, M. L. Shirley, Ed. (Houston Geological Society, Houston, TX, 1966), pp. 16–61 and fig. 2.

67. ADCIRC: Advanced Circulation Hydrodynamic Model, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS.

68. This work resulted from the authors' participation on the National Technical Review Committee as part of the LCA Project (58) and/or the Working Group for Post-Hurricane Planning for the Louisiana Coast (38). We thank C. Izdepski for help in the preparation of the manuscript and the reviewers for comments.

10.1126/science.1137030