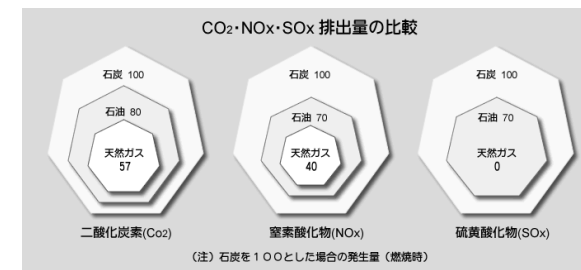
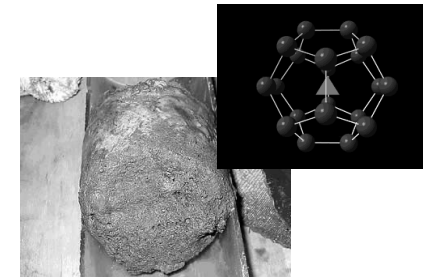
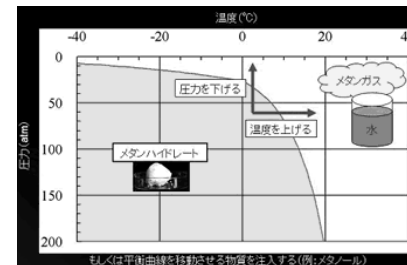


原油の供給障害リスクを考慮した メタンハイドレート開発の有効性評価

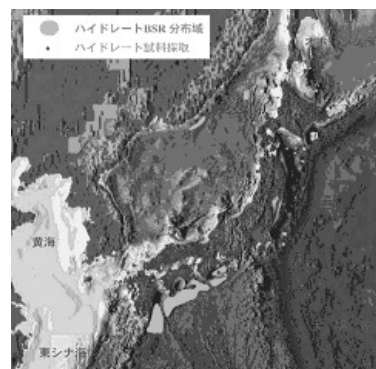
東京大学新領域創成科学研究科
海洋技術環境学専攻
佐藤 徹

メタンハイドレートとは

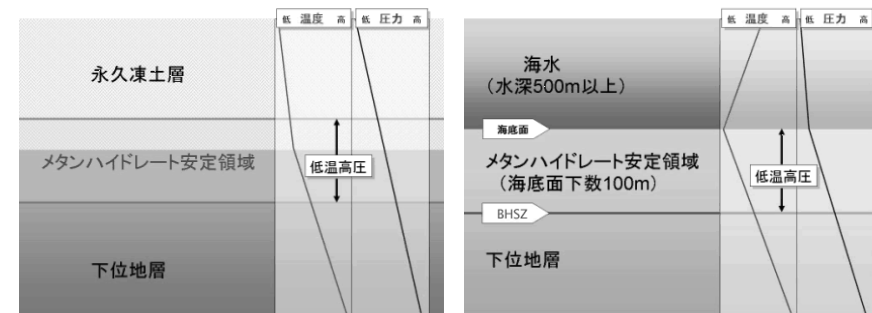


メタンハイドレートへの期待

- 天然メタンハイドレートは世界に広く分布し、その資源量は莫大
- 陸上では永久凍土層以深に存在
- 海洋では水深500m以深の海底下最大約400m程度まで存在可能
- 地層内の動植物の遺骸である有機物がバクテリアの分解や熱の分解によって発生したメタンが起源
- 日本周辺のメタンハイドレート資源量は、フリーガスも含めて7.35兆m³。これは日本が消費する天然ガスの約96年分である。
 - メタンハイドレート分解ガス量 4.65兆m³
 - メタンハイドレート下ガス(フリーガス)量 2.70兆m³
 - 合計 7.35兆m³

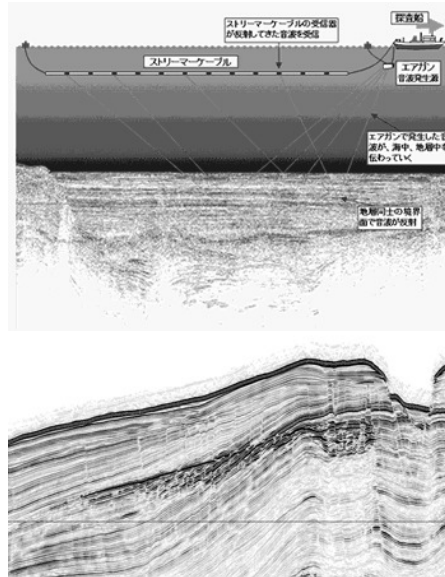


メタンハイドレート安定領域



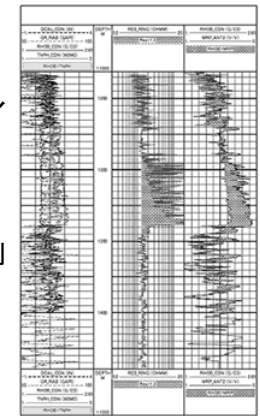
メタンハイドレート資源量推定

- 地震探査によって確認されたBSRの面積に、推測したメタンハイドレート層の厚さと、地層内のメタンハイドレート含有率を掛けて求める。
 - BSR (Bottom Simulating Reflector: 海底擬似反射面): 地震探査記録の中の通常の地層と異なる線。海底と平行して現れる記録なので「BSR」と呼ばれる。
 - メタンハイドレートの分解する温度・圧力と、BSRが存在する周辺地層の予想温度・圧力が一致。すなわち、BSRより上の地層にメタンハイドレートが存在し、BSRがメタンハイドレート最下層を示すと考えられている。



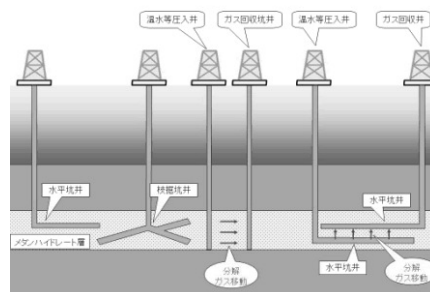
メタンハイドレート資源量推定

- 地震探査法ではメタンハイドレート層の厚さや含有率は不明。
- 井戸を掘り、井戸の中に機器を送り込み、検層する。
- 検層には、LWD (Logging While Drilling)、ワイヤーライン検層の2種類がある。
 - LWDは、地層を掘削しながらパイプ先端に設置されたセンサーによって地層の状況を解析。掘削しながら検層するので時間がかからない。
 - ワイヤーライン検層は、ある深度まで井戸を掘削した後、ワイヤーラインで吊るしたセンサーを井戸の中に送り込み、地層の状況を解析。多くの種類の検層が可能。
- メタンハイドレートは、「比抵抗値測定」という検層に大きく反応。この比抵抗値からメタンハイドレート層の厚さや含有率を見積もる。

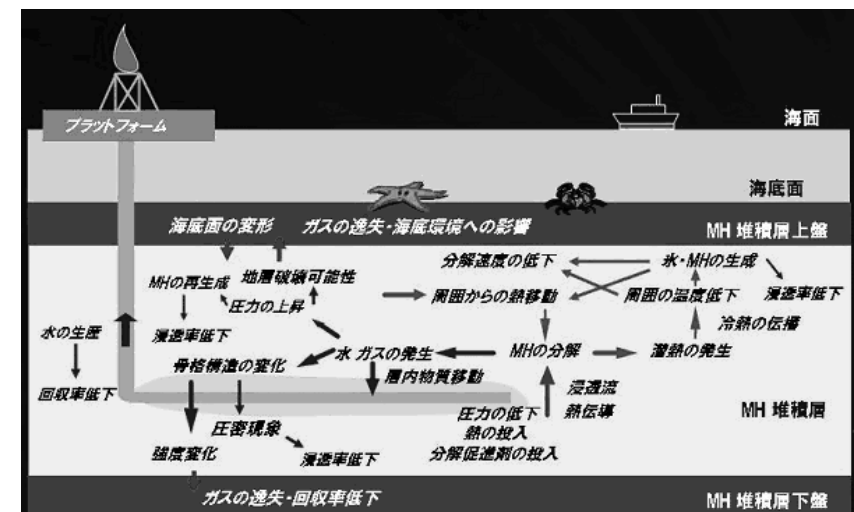


メタンハイドレートの生産方法

- 熱刺激法
 - 坑井からメタンハイドレート層に水蒸気や温水など温度の高い流体を注入してメタンハイドレートを分解させ、分解したメタンガスを回収。
- 減圧法
 - 坑井内の圧力を下げることで、メタンハイドレートを分解させ、メタンガスを回収。ポンプによって、メタンハイドレート層周辺の圧力を下げる方法や、坑井内に存在する掘削流体である泥水の量を減らすことにより減圧する方法など。
- インヒビター注入法
 - 坑井を通して、分解を促進するインヒビター(メタノールなど)をメタンハイドレート層に注入して、分解したメタンガスを坑井から回収。



メタンハイドレート生産の環境影響



背景

- コスト高のメタンハイドレート開発
MHの開発コストは70.2\$/Boe
- エネルギー自給率
原油のほぼ100%を輸入に依存するわが国の現状
- 輸入資源における供給障害リスクの表面化
ベラルーシのパイプライン停止
新興国、途上国の経済発展

目的

- 国産資源開発メリットの顕在化
グローバル市場の中で国産資源の利点：
供給障害時に優先的に日本へ供給
- 包括的環境影響評価指標IIIの試用
費用便益分析のみならず、MH開発によって回避できる
供給障害リスク・CO2削減効果も含めた評価

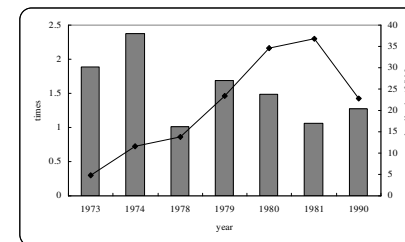
供給障害リスク

- **価格ベース**
供給障害由来と思われる年別原油価格の上昇から算出
価格比から1を引いたものを価格上昇度とする。
- **量ベース**
過去の供給障害データ

過去、事変等のイベントによる供給障害により日本の原油輸入量が減少したとみなせるケースはなく、影響はすべて価格の上昇として反映。

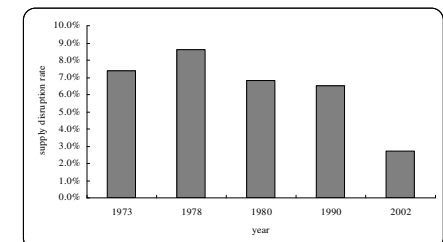
ただし、2007年1月に、ベラルーシのパイプライン停止により、ロシアからヨーロッパへの石油の供給障害が発生。我が国においても将来的には量的な供給障害が起こる可能性もあり。

過去のデータと平均供給障害



価格ベース

- ・7回
- ・平均価格上昇度0.54
- ・分散0.246



量ベース

- (世界供給量に対する)
- ・5回
- ・平均供給障害率6.4%
- ・分散0.000394

長期最大供給障害リスクの計算手法

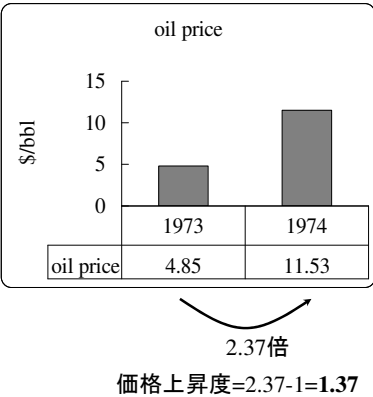
- 過去の供給障害事例から平均的供給障害規模と発生回数を導出
- 上のデータを用いてモンテカルロシミュレーションを行い、長期最大供給障害を予測
- 産業連関分析で経済影響を評価

価格ベースの供給障害リスク

価格上昇リスク

世界的供給障害イベント(オイルショック、産出国の政変、中東戦争等)由来と思われる原油価格の上昇データを元に、イベント前後の年別価格比から1を引いたものを価格上昇度(供給障害規模)とし、回数を分析年数で割ったものを価格上昇(供給障害)の発生確率とする。

過去30年間(1973年～2002年)では、価格上昇が起きたのは第4次中東戦争・イラン革命・湾岸戦争時などで発生回数は7回、平均の価格上昇度は0.54で、発生確率は7/30であった。



価格ベースの供給障害リスク
長期最大供給障害予測法

- 発生回数:ポアソン分布
 - 供給障害規模:ガンマ分布
- 10000回のモンテカルロシミュレーションを実施

供給障害回数 ポアソン乱数	供給障害規模 ガンマ乱数							
	0.2	0.5	0.3	0.9	1.2	0.4	0.5	
7	0.2	0.5	0.3	0.9	1.2	0.4	0.5	
3	0.3	0.5	0.1					
5	0.6	0.4	0.5	0.4	0.1			
...								

10000個の最大供給障害度を抽出、頻度の分布とする

価格ベースの供給障害リスク
長期最大供給障害予測

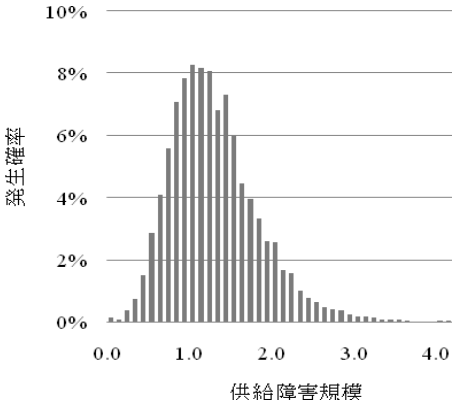


図1 価格上昇ケースにおける
30年間での最大供給障害規模の確率分布

価格ベースの供給障害リスク
長期最大供給障害予測

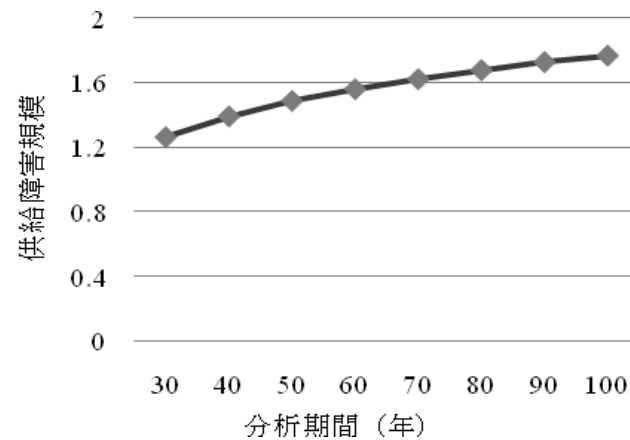


図2 価格上昇ケースにおける長期最大供給障害規模

価格ベースの供給障害リスク
経済影響の計算手法

● 産業連関分析価格波及モデル

$$\Delta P = \begin{bmatrix} 1-a_{11} & \cdots & \cdots & -a_{1,n-1} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ -a_{n-1,1} & \cdots & \cdots & 1-a_{n-1,n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_{n1} \\ \vdots \\ \vdots \\ a_{n-1,1} \end{bmatrix} \Delta p_n$$

石油・天然ガス以外の各産業部門の価格波及増分を、投入係数に石油・天然ガス部門の価格増分を乗じることによって算出。産業部門の価格波及増分 ΔP は、投入係数 a_{ij} および石油天然ガス部門の価格増分 Δp_n から求められる。ここで投入係数とは、ある産業の生産総額に対する他の産業からの投入額の割合である。

価格ベースの供給障害リスク
経済影響

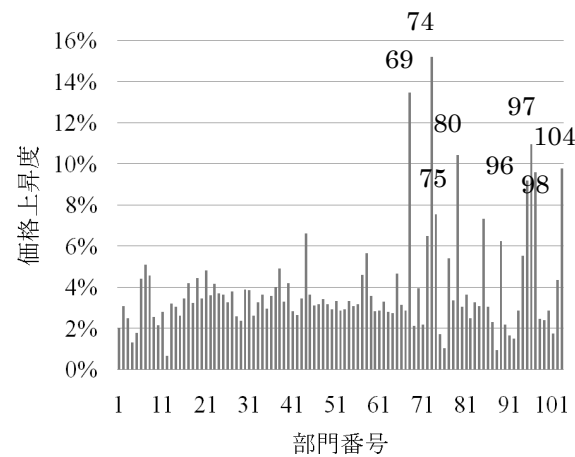


図3 価格上昇ケースにおける産業連関分析による各部門への影響

供給障害が大きな影響を及ぼしている部門は、金融・保険(部門番号74)、電力(部門番号69)、自動車・機械修理(部門番号97)、自家輸送(部門番号80)、分類不明(部門番号104)、その他の対事務所サービス(部門番号98)、物品賃貸サービス(部門番号96)、不動産仲介及び賃貸(部門番号75)

価格ベースの供給障害リスク
長期最大供給障害予測

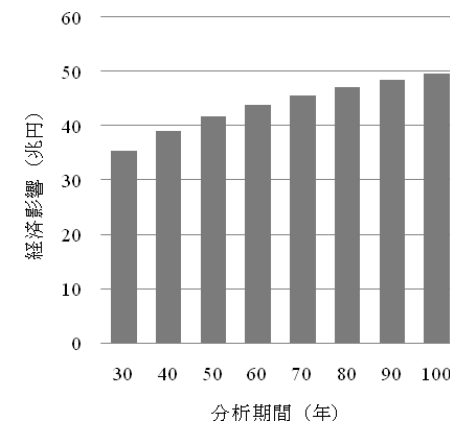


図4 価格上昇ケースにおける長期での最大供給障害による経済影響

- 経済影響 E
- 価格ベース：
30~100年間にかけ
て35兆円~50兆円
の経済リスク

価格ベースの供給障害リスク
メタンハイドレート代替によるリスク低減効果

- 価格上昇の供給障害の場合のメタンハイドレートによる原油供給障害の代替効果とは、代替による価格上昇リスクの低減であり、代替される割合に上記の長期最大供給障害規模を乗じたもの。そこで、代替率を年間原油・天然ガス需要量に対し10、15、20%として、代替割合分の経済影響が緩和すると考える。例えば分析期間80年における最大供給障害規模(価格上昇度)1.61を採用した時の経済影響は47.5兆円であるので、47.5兆に0.1、0.15、0.2を乗じた額が経済影響緩和額、すなわち価格上昇リスクの低減額。

価格ベースの供給障害リスク
メタンハイドレート開発の有効性評価

価格上昇のケースでは、80年間の最大供給障害規模(価格上昇度1.61)を想定し、供給障害時に年間原油天然ガス総需要量(2.52×109 Boe)の10%をメタンハイドレートが代替したケースについて考える。

供給障害リスクの低減(ベネフィット)と比較すべきメタンハイドレート生産に伴うコスト増とは、メタンハイドレートを継続的に生産し続けていると仮定し、ある障害から次の障害が起こるまでの期間(安定供給期間)のメタンハイドレート生産にかかるコストから、メタンハイドレートによって代替した分の原油の価格を減じたものとする。すなわち、代替した原油量と等しいエネルギー量のメタンハイドレートの開発コスト(62.9 \$/Boe)とその原油価格(50.97 \$/bbl)との差額の安定期間分となる。

安定供給期間には、安定供給が続く最大の期間の期待値(最大安定供給期間)を考えるのが妥当である。そこで最大供給障害量を計算した際と同様に、安定供給期間のガンマ乱数を与え、10000回のモンテカルロシミュレーションによってその期待値を求めた。

価格ベースの供給障害リスク
メタンハイドレート開発の有効性評価

最大安定供給期間は6.1 年、総生産量は1.53×10⁹ Boe。

メタンハイドレートによる代替にかかるコストは2.20×10¹²円
CO2排出については削減量が3.85×10¹⁰ kg-CO2で、その売却益は7.70×10¹⁰円
供給障害リスクの低減が4.75×10¹²円

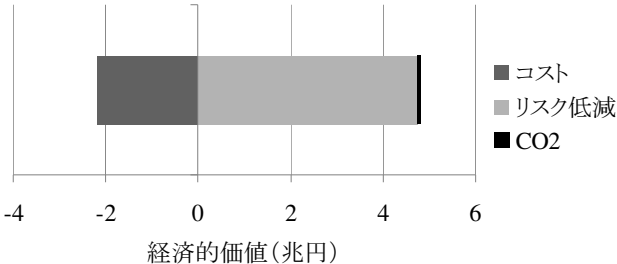


図9 価格上昇リスクに対する
メタンハイドレート開発の有効性評価

量ベースの供給障害リスク

量的供給障害リスク

過去に日本では量ベースの供給障害は起こっていない。そこで、過去の原油の世界的供給障害量の割合をそのまま日本の輸入量の減少割合として考え、平均供給障害度と年間発生確率を算出する。

過去30年間の世界的な供給障害は、スエズ動乱、第4次中東戦争、イラン革命時などに起こっており、その発生回数は5回、平均の障害規模(供給障害量の割合)は6.4 %であった。

量ベースの供給障害リスク
長期最大供給障害予測の計算手法

- 発生回数:ポアソン分布
 - 供給障害規模:ガンマ分布
- 10000回のモンテカルロシミュレーションを実施

10000個

供給障害回数	供給障害規模							
ポアソン乱数	ガンマ乱数							
7	0.2	0.5	0.3	0.9	1.2	0.4	0.5	
3	0.3	0.5	0.1					
5	0.6	0.4	0.5	0.4	0.1			
...								

10000個の最大供給障害度を抽出、頻度の分布とする

量ベースの供給障害リスク
長期最大供給障害予測

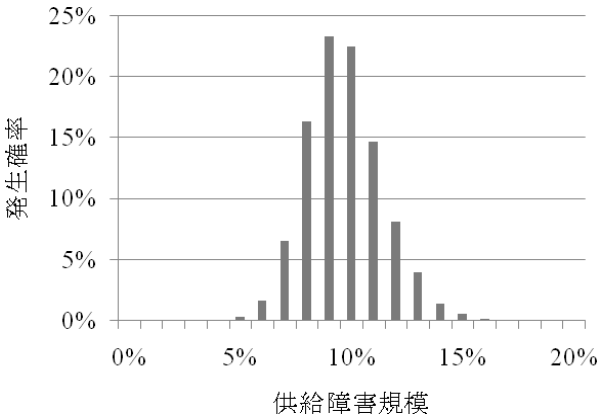


図5 量的障害ケースにおける
30年間での最大供給障害規模の確率分布

量ベースの供給障害リスク
長期最大供給障害予測

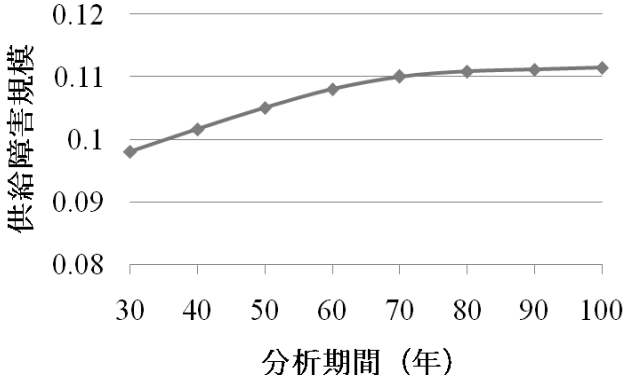


図6 量的障害ケースにおける長期最大供給障害規模

量ベースの供給障害リスク
経済影響の計算手法

● 産業連関分析価格波及モデル

経済影響額は産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)のエネルギー消費量における全資源に対する石油・天然ガスの供給障害量の比に原油供給障害量を乗じたものを各部門の生産縮小率として、産業連関表における各部門の生産額に乗じて求める。

例えば部門番号31のプラスチック製品であれば、原油・天然ガス起源原料(原油～LPGの計12原料)の投入量の合計が1,232,240 TOE、その他の原料投入量が3,269 TOEであるから、エネルギー消費量における原油・天然ガス起源原料の割合は99.7%、供給障害規模を6.4%とすれば、生産縮小率は6.38%となる。

これに産業連関表におけるプラスチック生産部門の国内総生産額 1.02×10^{12} 円を乗じた 6.51×10^{10} 円がこの部門の生産縮小額となる。これを全部門について行い、総和をとることで国内経済影響額とする。

量ベースの供給障害リスク
経済影響

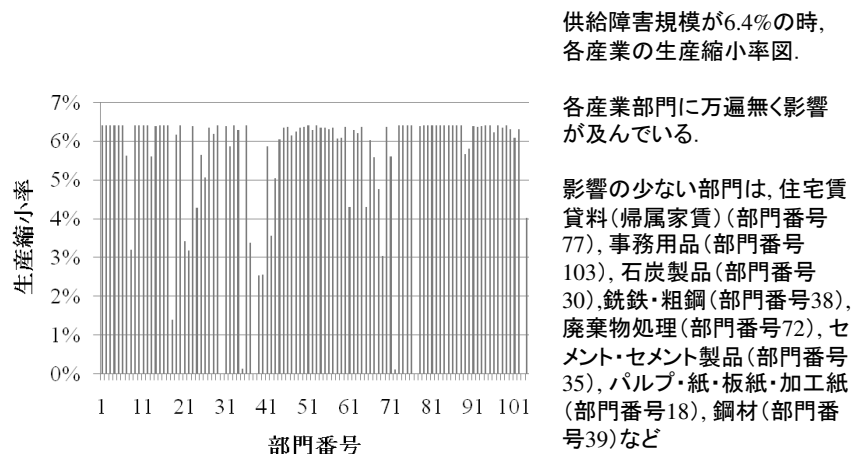


図7 量的障害ケースにおける各部門への経済影響度

量ベースの供給障害リスク
長期最大供給障害予測

価格ベースでの最大供給障害の期待値

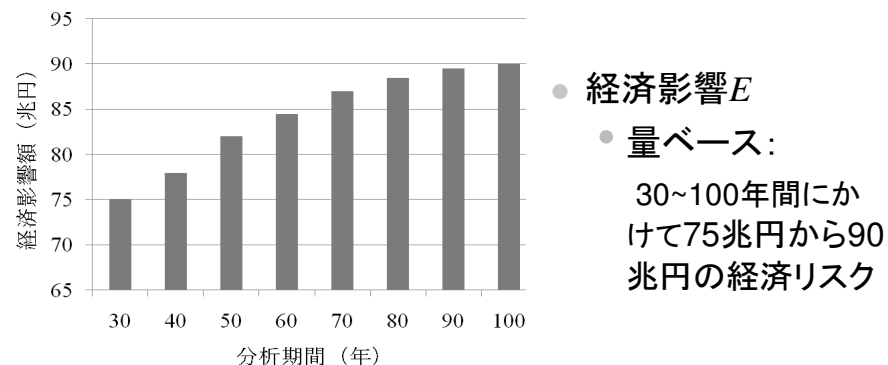


図8 量的障害ケースにおける
長期での最大供給障害による経済影響

量ベースの供給障害リスク
メタンハイドレート代替によるリスク低減効果

- 量的供給障害の場合は、原油供給障害率分をメタンハイドレートが代替することで、経済影響を0にするコストとして代替効果を算出。例えば分析期間80年での最大供給障害規模(量的減少率)10.8%を採用した時の経済影響88.0兆円が量的供給障害リスクの低減額。

量ベースの供給障害リスク
メタンハイドレート開発の有効性評価

80年間で最大供給障害規模(10.8%)を想定すると、価格ベースの供給障害と同様にモンテカルロシミュレーションによって求めた最大安定供給期間は6.7年

メタンハイドレートによる代替コストが 2.41×10^{12} 円
CO₂の排出削減については削減量が 4.21×10^{10} kg- CO₂で、その売却益は 8.42×10^{10} 円
供給障害リスクの低減が 8.80×10^{13} 円

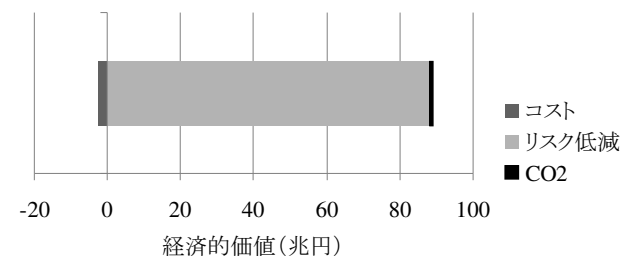


図10 量的供給障害リスクに対する
メタンハイドレート開発の有効性評価

III(包括的環境影響評価指標)

$$III = \Delta EF + \alpha \Delta ER + \frac{\sum EF}{\sum GDP} (\beta \Delta HR + \Delta C)$$

- *EF*: LCAによるCO2排出のecological footprint (gha)
- *ER*: 生態系リスク(gha)←本研究では算出せず
- $\sum EF / \sum GDP$: *EF*と経済価値の換算係数
- *HR*: 人間リスク(¥)→原油供給障害リスク
- *C*: 費用便益(¥)→コストー利益

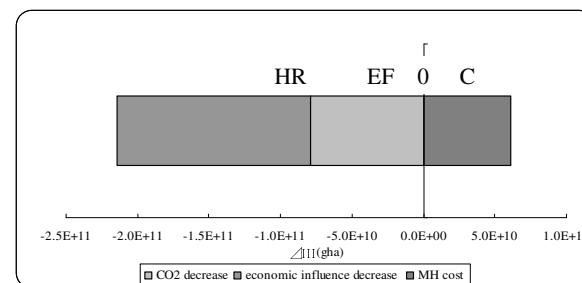
対象となる技術・開発を実施した場合としない場合の差で表現し、負であれば有効と判断

MH開発の有効性評価

IIIによる評価

価格ベース最大供給障害1.61を想定した場合

(80年間の期待値)



	(gha)
C	6.1E+10
HR	-1.4E+11
EF	-7.9E+10

結論

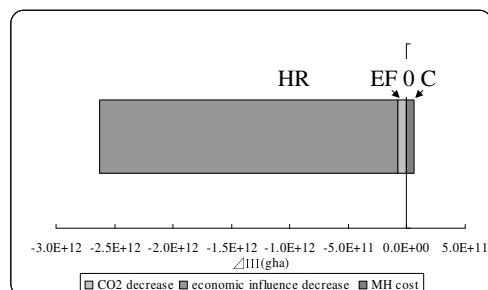
- 国産資源であるメタンハイドレート開発に関してコストのみでなく、原油の輸入に関する供給障害リスクを価格上昇と量的な供給障害の二面から算出し、さらにメタンガスと石油のCO2排出原単位の差を考慮し、その有効性を評価した。その結果、供給障害リスクについて長期最大供給障害への対応を考えた場合、メタンハイドレート開発のメリットは明らかであることがわかった。
- 本研究に関連する今後の課題としては、包括的なメタンハイドレート開発の評価という観点から、開発の際に懸念されるメタンガスの漏洩並びに地盤沈下などの環境リスクの算定、及び一次エネルギー資源を石油からメタンガスに置き換える際のインフラのコストの考慮が挙げられる。

MH開発の有効性評価

IIIによる評価

量ベース最大供給障害10.8%を想定した場合

(80年間の期待値)



	(gha)
C	6.6E+10
HR	-2.6E+12
EF	-8.6E+10