The Society of Naval Architects of Japan

北極海航路運航シミュレーション

正員 岸 進* 正員 山内 豊*
正員 亀崎一彦*

Simulation of Ship Navigation along the Northern Sea Route

by Susumu Kishi, *Member* Yutaka Yamauchi, *Member*
Kazuhiko Kamesaki, *Member*

Summary

The Northern Sea Route (NSR) shall keep its advantages in costs against other alternative transportation means including railways or routes through the Suez Canal. INSROP Phase II are assigned tasks to perform a ship transit simulation in order to answer concerns about the cost benefit and associated risks in case of utilizing the NSR commercially. In order to conduct the simulation; keeping with some confidences, multi disciplinary knowledge is necessary. Thus, Simulation of Ship Navigation project is divided into nine work packages (WPs) and our WP8 takes the responsibility of integrating other project results.

Chapter 1 describes introduction and background. Chapter 2 summarizes the conditions utilized in this simulation. Chapter 3 and 4 describe the computer code developed for this simulation. In this simulation, an effort is made to connect the ship velocity simulation code by WP6 and the ice conditions presented by WP2. The concept for the Ice Index originally introduced by the Arctic Ship Pollution Prevention Regulations (ASPPR) as ice numerals is modified to express the ice conditions quantitatively as a solution, then the probabilistic relations between the ice condition and ship velocity are developed. This method considerably enables shortening of the simulation time with keeping rational relation between the ice condition and transit time. Chapter 5 summarizes the results. The simulation was performed in twofold. One is the simulation named Monthly Voyage Simulation (MVS) representing the required cost on each month. MVS is the most preferable method to look at the general trends for the variations for transit times by season and sea area, and icebreaker escort times etc. The other is the simulation named Annual Serial Voyage Simulation (ASVS). ASVS aims to estimate a number of voyages per year and evaluated freight cost per voyage as $/ton. ASVS is widely used by the shipping industries to judge feasibility in terms of cost and profit. Final chapter describes conclusion and recommendation from the study. The capital cost and icebreaker tariff have significant effects among the cost parameters. The tariff rate of 4.0$/GT seems to make the NSR economically feasible under the condition that the performance in open water of ice-breaking bulk cargo is improved. The Ice Index will be a good index to quantitatively express the difficulty of the navigation in the NSR.

1. 緒 言

平成５年から平成１０年にかけて国際北極海航路計画(International Northern Sea Route Programme : INSROP)が日本、ロシア、ノルウェーを中心として実施され、極東と欧州の最短航路となる北極海航路(Northern Sea Route : NSR) の商業的通年航行の可能性に関する調査研究が行われた。その内容は Phase I と Phase II に分れ、最初の３年間実施された Phase I では(1)北極海の自然条件と氷海航行技術、(2)NSR の啓開が環境に及ぼす影響、(3)NSR の経済性評価、(4)NSR の啓開に関わる政治的法制的検討という４つのサブプログラムを中心に調査研究が行われた。平成８年に国

*NKK エンジニアリング研究所

原稿受理 平成12年1月11日
春季講演会において講演 平成12年5月18，19日

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

際評価委員会が設けられてPhase Iの成果が評価され、その提言に基づいて平成９年、１０年でPhase IIが実施され、さらなる研究調査、NSR運航シミュレーション及び研究成果の統合が行われた。

本論文ではINSROP Phase IIの一環として行われたNSR運航シミュレーションについて述べる。NSRの現状はロシアの貨物船により中国などに向けた輸送が細々と行われているにすぎないが、将来本格的な商業航路として使用される事を想定すれば、どの船種を投入した時、どの程度の経費が必要かを推定してスエズ経由と対比し、問題点を挙げて経済的に成り立つための条件を提言しておく事は非常に重要である。NSRの経済性を検討・評価するには、具体的に航路を設定し、理想とする船を設計し、精度のある氷況等の環境データを用いた総合的な運航シミュレーション行うことが適当な手法と考えられる。

NSR運航シミュレーションは、ロシア、フィンランド、ノルウェー、日本の研究機関が参加し、合計９つのWork Package (WP)に分けて実施された。WP0は全体調整、WP１は航路選定、WP2は環境データの整備・提供、WP3は物流予測、WP4は砕氷商船の設計と性能予測、WP5はロシア砕氷商船の性能・構造データ調査、WP6は船速コードの開発、WP7は航路の法制面からの検討と環境影響評価、WP8は全体の成果を取り入れた運航シミュレーションの実施と運航経済性の評価がタスクで、筆者らはWP8を担当した。

過去にもNSRの運航シミュレーションは試みられた。Wergeland[23]はNSRの商業航路としての可能性を示し、Shwarz[18]はコンテナ船を用いたシミュレーションで経済性の検討を行った。Mulherin[15]はモンテカルロ法を用いて氷況を計算し、その氷況に基づく経験的な船速を用いてシミュレーションを行った。しかしながら、いずれの方法も船速と氷況の関係を表形式等で仮定したもので、その信頼性は乏しいものであった。

本シミュレーションの特徴は、与えられた氷況における船速を予測する数学モデルを新たに開発し、氷況データについては、ロシアが過去約４０年間の歴史的データを航路に沿って整理したものを用い、船速と氷況の関係を正確に評価したことにある。また、砕氷貨物船には最も先進的な砕氷技術を取り入れた船型を用い、氷海水槽試験を行って船速と馬力の関係を求め精度向上に努めた。

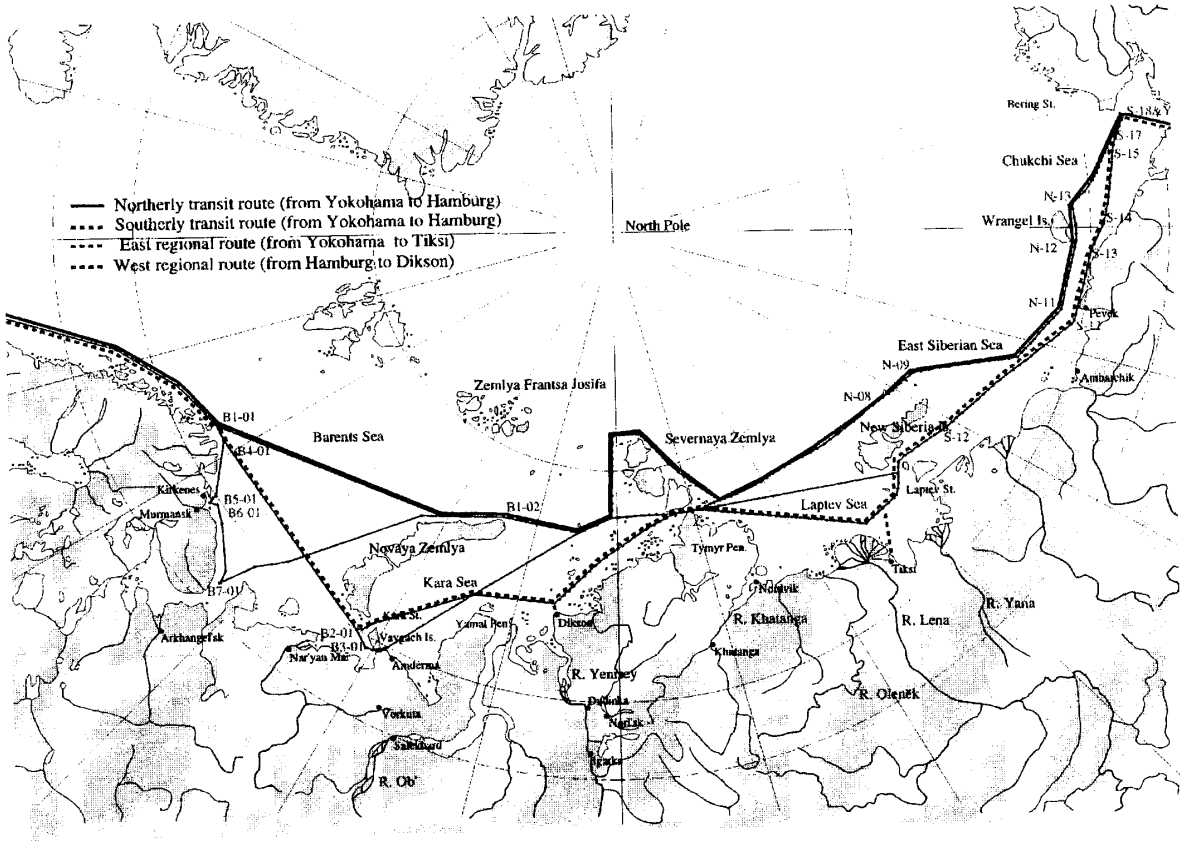

Fig. 1 Schematics for four routes

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

2. シミュレーション条件

2.1 航路

航路は Baskin[2]らが定めた以下の４航路を用いた。

(1) Northerly transit route (北航路)
(2) Southerly transit route (南航路)
(3) East regional route (東航路)
(4) West regional route (西航路)

４航路を Fig.1 に示す。北航路は比較的高緯度の航路で船の喫水が 12.5m まで、南航路は低緯度のロシア沿岸航路で船の喫水が 9.0m まで可能な様に設定された。東航路と西航路は南航路の一部で、各々 Hamburg～Dikson、横浜～Tiksi の航路である。NSR は Chukchi 海から Kara 海までである。４航路中における NSR の距離を Table 1 に示す。NSR 内の航路には 20 海里ごとにポイントを設け、各ポイント間（セグメント）に対応する環境データが準備された。NSR 以外の領域の航路には適当な間隔でポイントを設け、NSR 近傍を除いたセグメントでは氷が無いと仮定した。

Table 1 Distances of four routes

Route name	Route points	Distance within the NSR (NM)	Distance outside the NSR (NM)	Total distance (NM)
Northerly transit route	Hamburg to Yokohama	2,446 (34%)	4,750 (66%)	7,196
Southerly transit route	Hamburg to Yokohama	2,680 (37%)	4,650 (63%)	7,330
East regional route	Hamburg to Dikson	1,326 (33%)	2,694 (67%)	4,020
West regional route	Yokohama to Tiksi	468 (20%)	1,929 (80%)	2,397

2.2 環境データ

環境データは Brestkin[3]らによって纏められて供給され、1953 年～1990 年の航路上各セグメントの月別平均値で、その総数は約 100 万個のデータである。環境データを Table 2 に示す。シミュレーションには Table 2 の中の積算感度(No.1)、１年氷平均密接度(No.2)、多年氷平均密接度 (No.3)、平均氷厚(No.7)、氷盤サイズ(No.12)、氷丘高さ(No.13)、平均リッジ密度(No.16)の７つのパラメータを用いた。しかしこれらのデータの中には観測出来ていない領域や年が有り、全て充足している訳ではない。充足率が 50%未満の 1953 年～1956 年、1961 年～1964 年と 1972 年のデータは用いないことにした。欠落しているデータはその前後のセグメント又は前後の月のデータを用いて補間した。リッジ密度の充足率は 27%と低いが、重要なパラメータであるため、欠落個所には全データの平均値を充てた。

Table 2 Environmental Data

No.	Parameter	Unit	No.	Parameter	Unit
1	Cold sum	°CDay	10	Wind direction	degree
2	Mean first-year ice concentration	1/10	11	Current direction	degree
3	Mean multi-year ice concentration	1/10	12	Floe size	km
4	Minimum ice concentration	1/10	13	Mean ridge size (sail height)	cm
5	Maximum ice concentration	1/10	14	Maximum ridge size	cm
6	Level ice thickness	cm	15	Maximum possible ridge size	m
7	Mean ice thickness	cm	16	Mean ridge density	1/km
8	Minimum ice thickness	cm	17	Minimum ridge density	1/km
9	Maximum ice thickness	cm	18	Maximum ridge density	1/km

2.3 積荷の種類

現在の潜在的な荷動きから、NSR に適する輸送形態を考える。NSR が将来的にに実現すれば、現在スエズ経由で輸送されている EU～極東間の貨物の何割かは NSR にシフトすると予想される。EU から日本、韓国、中国、香港、台湾の五カ国に輸出されている製品は、石油製品、鉱石、肥料、穀物、金属製品、化学品、セメントで、その総輸出量は 1,600 万トンに達する。また潜在的には自動車、電化製品、コピー機、電子部品などの貿易もある。これらは高価な製品であり、専用船、コンテナー船などが必要であり、定期性と定時性が求められるものである。また、これらの製品は NSR 通過時の温度差による被害を受けやすく、NSR には不向きであると判断される。

Isakov[4]らの近年のロシア北極海沿岸地域とアジア太平洋地域の間の物流に関する調査結果によると、1996 年のロシアおよびバルト海三国からアジア向けの輸送は約 500 万トンに達し、その大半は中国向けである。製品別の分布を見ると、鉄製品、肥料がその主たる品目である。これらの品目は定時性に対する要求が比較的低く、温度に対する耐性もあり、NSR に適した品目である。NSR の通行料、入港税などの改善が図られ荷主に対して十分な保護が与えられれば、この内、170～190 万トンが NSR にシフトされる可能性があると報告している。NSR 輸送貨物の活性化のシナリオとしては、定期性、定時性を必要としない、温度差に強いバルク貨物の増大から始まると予測するのが妥当であろう。

2.4 砕氷貨物船

船種は NSR の将来物流予測からバルクキャリアーを想定し、40,000DWT 及び 25,000DWT の砕氷型バルクコンテナー（40BC, 25BC）と 50,000DWT 砕氷型バルカー（50BC）の計３隻を用いた。40BC 及び 25BC は Juurmaa[5]らによって、50BC は INSROP の国内委員会でそれぞれ計画・設計され、各々の性能は水槽試験で確認された。主要目を Table 3 に示す。

砕氷型バルクコンテナー40BC

本船は北航路を対象に喫水 12.5m とし８ヶ月間単独航行できる砕氷能力を有することを条件として計画さ

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

れた。一般配置を Fig. 2 に示す。推進システムは電気推進で、出力 14MW の電動モーターをポッドの中に収めた 360 度回転可能な Azipod と呼ばれる推進器を２基装備している。このため、舵が無く旋回性が極めて優れている。また、比較的穏やかな１年氷の中では船尾を先頭にして砕氷する船尾モードの推進方式を取ることも可能である。多年氷の中では、強固な多年氷が Azipod に衝突して損傷を受ける危険性があり、通常の船首モードの推進方式を採用する。砕氷能力は水槽試験により、船首モードでは厚さ1.2mの平坦氷を5.8 knot、船尾モードでは厚さ 1.8m の平坦氷を船速 2.1 knot で連続砕氷可能と確認された。氷丘突破性能については、キール深さ 15m の１年性氷丘を突破するために３回のラミングを必要とする。平水中の性能は出力 15.8MW(21,500PS)で 15%シーマージンを考慮して船速 14.5knot である。

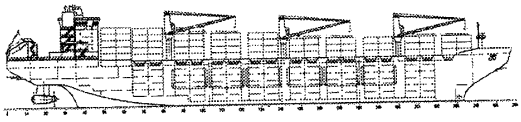

Fig.2 40,000DWT Icebreaking Bulk/Container Ship

Table 3 Principal dimensions for the service ships and icebreaker

Parameter	Unit	Ship			
		25BC	40BC	50BC	Arktika
Loa	m	199.9	206.5	252.0	148.0
Lpp	m	184.1	186.1	240.0	136.0
Length of bow region	m	36.8	51.1	24.6	35.5
Length of parallel part	m	86.1	50.0	62.6	65.0
B	m	25.1	27.5	30.0	28.0
D	m	15.0	16.0	18.8	17.2
d	m	9.0	12.5	12.5	11.0
Stem angle	deg	30.0	30.0	25.0	24.0
Waterline entrance angle	deg	52.0	50.0	43.0	40.0
Cb		0.813	0.751	0.767	0.546
Cm		0.995	0.998	0.978	0.900
Cp		0.817	0.751	0.784	0.607
Cwp		0.949	0.932	0.847	0.701
Speed in open water	knot	14.50	14.50	17.00	20.80
Number of propellers		2	2	1	3
Propeller diameter	m	5.2	5.8	7.1	5.3
Shaft power	kW	24000	28000	18400	49000
Displacement	MT	35700	52000	70960	23460
Gross tonnage	GT	21000	22600	31000	-
Cargo tonnage	MT	21500	36000	47000	-
Fuel consumption of main engine	g/ps/hour	187.1	187.1	171.2	-
Fuel consumption of GE (sea going)	MT/day	-	-	1.54	-
Fuel consumption of GE (port)	MT/day	3.81	3.81	3.08	-

砕氷型バルクコンテナー25BC

本船は南航路、東航路及び西航路を対象に喫水 9.0m とし、40BC と同一の砕氷能力を有するように計画された。一般配置は 40BC と類似しているが、L_{PP} が 1.9m、B が 2.4m、D が 4m、40BC より小さい。性能は水槽試験を実施せず 40BC の性能より推定した。

砕氷型バルカー50BC

本船は北航路を対象とした喫水 12.5m、50,000DWT 型の砕氷貨物船である。一般配置を Fig.3 に示す。船型は砕氷性能の優れたスプーン形状船首と平水中性能が優れた従来型船首のフレームラインを取り入れた船型で、船尾形状は旋回性能が優れた比較的フレアー角度の大きい形状とした。推進システムはディーゼル直結４翼 FPP である。水槽試験より、砕氷能力は厚さ 1.2m の平坦氷を船速 3 knot で連続砕氷可能で、平水中性能は出力 25,000PS (18.4MW)で 15%シーマージンを考慮して船速 17.0 knot である。40BC、25BC が砕氷能力重視の船型に対し、本船は平水中推進性能重視の船型である。

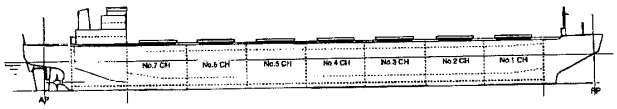

Fig.3 50,000DWT Icebreaking Bulk Cargo

2.5 運航コスト

Table 4 に本シミュレーションで用いた運航コストを示す。運航コストは資本費、船員費、メンテナンス費、保険費、燃料費、砕氷船エスコート費、港費から構成される。これらのデータは Juurmaa[5]、Yakovlev[24]、日本郵船（株）より提供された。

Table 4 Cost tables for service ships

COST	Unit	25BC	40BC	50BC
Ship price	M$	57	66	30
Capital cost	M$/year	6.45	7.46	3.39
Crewing cost	k$/day	4.21	4.21	4.38
Maintenance cost	k$/year	473	493	560
Insurance cost				
*NSR	$/GT/year	10	10	10
	k$/year	210.0	226.0	310.0
*SUEZ route	$/GT/year	5.7	5.5	4.8
	k$/year	119.7	124.3	148.8
Fuel unit cost	$/ton	91	91	91
Port dues				
*Hamburg (6days)	k$/stop	78.2	84.2	113.1
*Dikson (4days)	k$/stop	19.2	--	--
*Tiksi (4days)	k$/stop	19.2	--	--
*Yokohama (6days)	k$/stop	44.5	47.4	59.7
SUEZ canal transit tolls	k$/transit	122	127	139
Number of crews	person	24	24	25
Gross tonnage	GT	21,000	22,600	31,000

資本費

資本費の償還年数は 15 年、金利は 7%と仮定し、ローン返済方式は元利均等払いとした。各年の資本費は、借入金を船価と乗り出し費用の和として算定した。乗り出し費用は船価の 3%とした。

運航費（船員費、メンテナンス費、保険費）

船員は各々の船に５名の日本人船員が含まれると仮定し、単価は実績に基づいて定めた。メンテナンス費は建造後５年間の年間保守費の平均で、実績に基づい

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

て定めた。保険費の設定は実績が無いため困難だが、氷中航行のリスクはスエズ経由よりも大きい。通常、船の保険費はP&I (Protection and Indemnity)、H&M (Hull and Machinery)に対して課せられる。P&I 保険はSemanov[19]らの調査結果をもとに8$/GTとした。またH&M 保険は損傷率を基に船価に応じて定められるが、NSR の損傷率の公表データは無いので、全損率を0.1%と仮定して概算した。以上の仮定から各々の船の総トン数当たりの保険費を求めると 1$以下のばらつきが生じたが、不確定要素を含む事を考慮し、年間一律10$/GTと設定した。

港費

横浜と Hamburg の港湾費は、実績に基づいて定めた。Dikson と Tiksi の港湾費は、Semanov[19]らによる北極海ロシア沿岸の港湾情報を基に定めた。

燃料費

380cSt の C 重油を使用すると仮定し、燃料費は最近5年間の市場価格平均値を用いた。

砕氷船エスコート費

砕氷船エスコート費は、Semanov[19]らの調査結果に基づいて定めた。砕氷船エスコート費は、Icebreaker tariff（タリフ）、Ice pilot fee、Route recommendation fee から構成される。タリフはエスコートを受ける船の総トン数、アイスクラス、航海時期及び航路によって定まる。Table 5 に現行のタリフテーブルを示す。20,000GT までしか規定されていないが、本シミュレーションの対象船は全て 20,000GT 以上であるので、これらの値を外挿してタリフを定めた。タリフは1航海について課せられ、何回エスコートを要請しても一定料率となっている。この仮定については6節で考察する。Ice pilot は、航路によって1名または2名の乗船が要求され、4航路の中では西航路のみ1名の ice pilot が必要で、他の航路では2名の ice pilot が必要である。

Table 5 Icebreaker Tariff

Ice class of vessle	Regisiter tonnage(GT)		Cost of leading USD/GT		
			Summer		Winter
	From	to	Entire NSR	Part of NSR	
Icebreaker	5001	6000	7.26	4.36	6.53
	10001	11000	6.58	3.95	5.92
	19001	20000	5.49	3.29	4.94
ULA	5001	6000	9.98	6.49	9.73
	10001	11000	9.04	5.88	8.82
	19001	20000	7.54	4.90	7.36
UL	5001	6000	18.15	11.80	17.70
	10001	11000	16.44	10.68	16.03
	19001	20000	13.72	8.92	13.37
L1	5001	6000	22.69	15.88	23.82
	10001	11000	20.55	14.38	21.58
	19001	20000	17.15	12.00	18.00

3. Ice Index

3.1 船速コード

船速コードは Riska[9]らによって開発され、平坦氷、氷丘、流氷、開水中の氷況における船速計算が可能なコードである。船速の算出法は、船の推力（Net thrust：氷を割るための有効推力）が、各氷況での氷抵抗に等しいとして求められた。これを模式的に Fig. 4 に示す。船の推力は式(1)、(2)で求められた。

$$T_{net} = T_{pull} \times \left[1 - \frac{v}{3v_{\max}} - \frac{2}{3} \times \left[\frac{v}{v_{\max}}\right]^2\right] = R_i \qquad (1)$$

$$T_{pull} = K_e \times \left(D_p \times P_D\right)^{\frac{2}{3}} \qquad (2)$$

ここに、vは船速、v_{max}は平水中での計画速力、T_{net}は推力（kN）、T_{pull}はボラードプル推力（kN）、Keは係数で 0.782、Dpはプロペラ直径（m）、P_Dは軸出力（kW）、Riは砕氷抵抗である。砕氷抵抗は平坦氷中の抵抗[11]、氷丘中の抵抗[12]、流氷の中の抵抗[11]の和である。尚、開水中の船速は計画速力 v_{max}である。

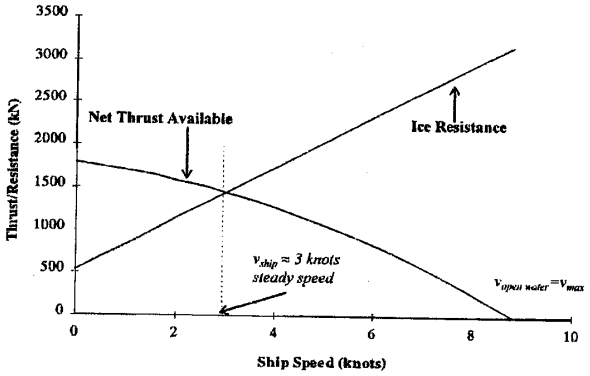

Fig. 4 Schematic of the solution for ship speed

3.2 Ice Index の導入

Ice Index は ASPPR の Arctic Ice Regime Shipping System Standards の Ice Numeral(IN)の考え方を参考にしたものである。IN は小さくなるほど航海難易度が高い氷況を表し、また同じ氷況でも砕氷能力の低い船ほど IN が小さくなる仕組みになっている。IN が負になると航行が危険な海域と判断される。

ここでは環境データより Ice Index を求め、船速コードを用いて、Ice Index と船速分布の関係を表すチャートを開発し、それをシミュレーションプログラムの中に組み込んで計算を効率的化した。Ice Index は IN を算出する氷の種類、氷厚、密接度の他に、曲げ強度、圧縮強度、氷丘の大きさ、氷丘の分布、厳しい氷況の回避、氷盤から受ける横力の影響を考慮した。

3.3 Ice Index の構成要素

Ice Index は式（3）に示す3種類の Ice Index：I_A、I_B、I_Cから構成される。

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

$I=I_A+I_B+I_C$ (3)

I_A：1年氷及び多年氷の影響を表すIce Index

I_B：氷丘の影響を表すIce Index

I_C：積算感度（曲げ強度、圧縮強度）の影響を表すIce Index

I_A：1年氷及び多年氷の影響を表すIce Index

砕氷船のクラスはASPPRの分類を使用して、砕氷貨物船のクラスは全てTYPE A、エスコート砕氷船のクラスはCAC1とした。I_Aの算出法を以下に示す。最初に平均氷厚と、Table 6より一年氷の種類(Ice type)を求め、Table 7より砕氷船クラス(ship category)から多年氷及び一年氷の乗数(Multiplier)を求めた。

Table 6 Ice type

Ice type	Ice thickness
TFY	120cm≦hi
MFY	70cm≦hi<120cm
THFY2	50cm≦hi<70cm
THFY1	30cm≦hi<50cm

Table 7 Multiplier

	Ship category				
Ice type	TYPEA	CAC4	CAC3	CAC2	CAC1
MY	-3.5	-2.5	0	2	2
TFY	-1	1	2	2	2
MFY	1	2	2	2	2
THFY2	2	2	2	2	2
THFY1	2	2	2	2	2
OW	2	2	2	2	2

次に一年氷の平均密接度：C_fと多年氷の平均密接度：C_m及びMultiplierを用いて、Ice Index：I_Aを式(4)により算出した。

I_A=1年氷の Multiplier×C_f ＋ 多年氷の Multiplier×$C_m+2\times(10-C_f-C_m)$ (4)

I_B：氷丘の影響を表すIce Index

I_BはI_Aと同様な方法で求めた。ここでは平坦氷の密接度に相当する氷丘密接度C_rを導入した。まず、氷丘高さh_Sより、式(5)、Fig. 5に示す様に氷丘形状を仮定し、氷丘の幅W_kを氷丘高さh_Sの20倍とした。

$W_k=4h_k,\ h_k=5h_S$ (5)

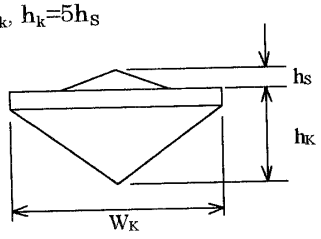

Fig. 5 氷丘プロファイル

ここに、h_kは氷丘深さである。次に、W_kと氷丘の分布を用いてC_rを求めた。C_rは0～10の値を取り、0の場合は氷丘が全く無い状態であり、10の場合は氷盤が氷丘で埋め尽くされた状態とした。C_rはW_kと氷丘の分布＝平均氷丘密度Dr(1/km)を用いて式(6)の様に仮定した。

$$C_r = W_K \times \frac{D_r}{1000} \times 10 = \frac{h_s D_r}{5} \quad (6)$$

最後に、I_Aと同様の手法でI_Bを算出した。氷丘の密接度の影響を関数$F(Cr)$として表し、式(7)に示すような形でI_Bを求めた。

$$I_B = F(C_r) \times (C_f + C_m) \quad (7)$$

さて、INの定義では、氷丘の影響は、氷盤の1/3以上が氷丘で覆われかつ密接度が6以上の場合にのみ、Table 7のMultiplierから1を減じる。すなわち氷丘密接度C_r>3.333かつC_f+C_m≧6の条件下で$F(Cr)=-1$としている。ここでは氷丘密接度Crを用いてさらに詳細に氷丘の影響を式(8)に示すように仮定した。

$$F(C_r) = -2 \times \frac{C_r}{10} \quad (8)$$

すなわち氷丘の影響は、氷盤密接度が6以上の場合に限定せず、すべての氷盤密接度に対して影響を考慮することにした。これをFig. 6に示す。すなわち、全面が氷丘で覆われた時は、ASPPRの倍の影響を考慮することになる。

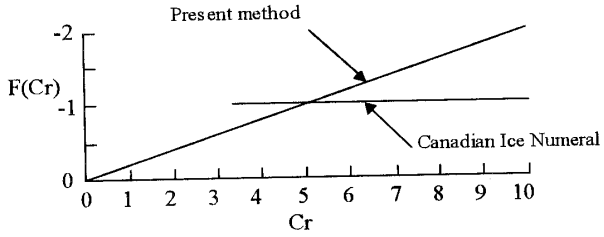

Fig. 6 Comparison for $F(C_r)$ between Canadian Ice Numeral and present method

I_C：積算感度（曲げ強度、圧縮強度）の影響を表すIce Index

氷の強度は気温と氷の塩分濃度に強く依存するので、積算感度から求めた月平均気温に応じた氷の強度をRiska[13]に従い、Table 8に示すように定めた。I_Cは乗数M_{CS}を用いて式（9）の様に定めた。

I_C=1年氷の$M_{CS}\times C_f$+ 多年氷の$M_{CS}\times C_m$ (9)

ここに、M_{CS}値は船速コードを用いて曲げ強度と圧縮強度の値を変化させたパラメトリックスタディを行って定めた。

Table 8 Multiplier for ice strength, M_{CS}

Ice type	First-year ice			Multi-year ice		
Monthly average temp.:T	T≦-10	-10<T≦-2	-2<T≦0	T≦-10	-10<T≦-2	-2<T≦0
Bending strength (kPa)	600	450	300	1600	1200	800
Compressive strength (kPa)	6000	4500	3000	9000	6500	4000
M_{CS}	-0.12	0	0.12	-0.44	0	0.44

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

3.4 Ice Index と船速の関係

Ice Index と船速の関係を表すチャートの作成に全ての環境データを用いると膨大な時間を要するため、環境データを適当に組み合わせ、その組み合わせたデータに対して船速コードにより船速を求めることにした。環境データとして、Ice Index の主要構成部である1年氷と多年氷の平均密接度、平均氷厚、氷丘高さ、氷丘密度を選んだ。次に、この環境データついて 38 年間平均値とその標準偏差を求め Table 9 に示すようなデータセット（Low value =平均値-標準偏差、Mean =平均値、High value =平均値+標準偏差）を作成し、5項目3種のデータの組み合わせ、3^5=243 組の基本環境データを作成した。

Table 9 Basic environmental data

Parameter	Unit	Low value	Mean	High value
Mean first-year ice concentration	1/10	2.3	6.3	10.0
Mean multi-year ice concentration	1/10	0.0	1.4	4.0
Mean ice thickness	cm	27	97	168
Mean ridge size (sail height)	cm	39	94	149
Mean ridge density	1/km	0.0	13.9	27.7

3.5 対象船型の Ice Index と船速

船速コードを用いて上記 243 組の環境データに対応する船速分布を計算し、Ice Index と船速の関係を表すチャートを開発した。計算対象船は 40BC、25BC、50BC、エスコート砕氷船の4船種である。エスコート砕氷船には Arktika クラスの原子力砕氷船を採用した。

氷海航行においては、氷海船舶の操船者は、ある程度航路が長くなっても厳しい氷況を避け、なるべく開水域を航行する様に操船する。この操船は氷厚と密接度によって決定されるが、結果として航行距離が長くなるため、平均的に船速が低下する。この操船による船速修正パラメタを C_{MA} とし密接度が大きいほど針路を変え難いことから Table 10 に示す様に仮定した。

Table 10 Adjust parameter C_{MA} for maneuvering

Total ice concentration	C_{MA}
6/10-10/10	0.95
1/10-5/10	0.97

また氷海航行においては氷海船舶に船側方向から氷盤圧力が作用する。この力は風や潮流が主な原因で、その横力により船の船体表面と氷の摩擦が生じて船速低下をもたらす。氷盤圧力の船速に対する影響は船速コードを用いて定めた。船体と氷の摩擦係数は 0.1、開水路が閉じる速度は 0.3m/sec と仮定した。修正パラメータを C_{CO} とし、Table 11 に示すように仮定した。C_{MA} と C_{CO} は船速に対する修正係数として用いた。

Table 11 Adjust parameter C_{co} for ice compression effect

Ship	C_{CO}
Arktika	0.95
25BC & 40BC	0.88
50BC	0.80

40BC と Arktika の Ice Index と船速の関係を示すチャートを Fig. 7、Fig. 8 に示す。船速は2階級ごとの Ice Index に対応して整理した。船速はある階級の Ice Index に対して分布形状で求まるが、その分布を5段階の確率分布として整理した。

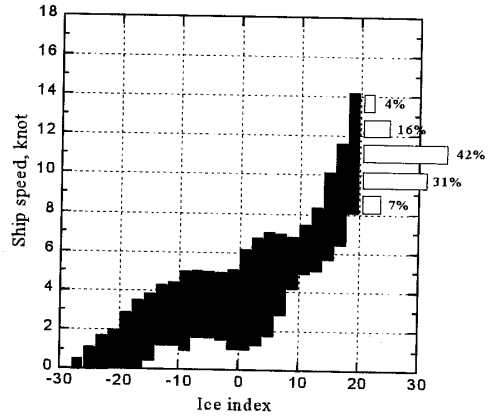

Fig. 7 Ice Index vs. ship speed for 40BC

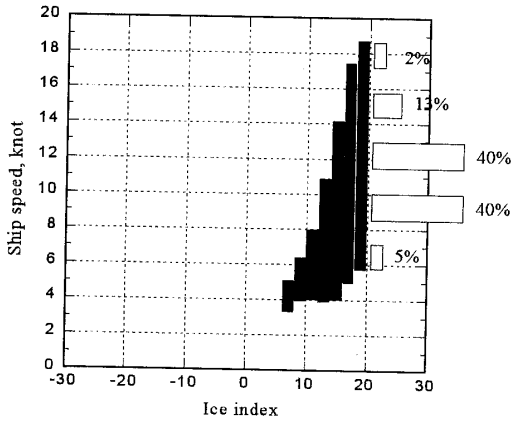

Fig. 8 Ice index vs. ship speed for Arkrika

4. 運航シミュレーション

4.1 概要

本シミュレーションは、航路の各セグメントの環境データと Ice Index によって算出される船速分布から航

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

海時間の分布、運航コストの分布を計算し、これらを航路全体について積算して1航海のコスト確率分布を求める。主な特徴を以下に示す。

(1) 環境データとして過去 38 年間のロシアの歴史的なデータを用いている。

(2) 航路のセグメント長として 20 海里という比較的短い距離を用いている。

(3) 氷況から船速を予測するパラメータ Ice Index を導入しシミュレーション計算を効率化している。

4.2 シミュレーションにおける仮定

砕氷船エスコートの判定

砕氷貨物船が単独航海できるか否かの判定に Ice Index を用いた。航行不能となる船速の下限は 3knots とし、その時の Ice Index を INc とし、Fig. 7 等から 40BC と 25BC については INc=−4, 50BC については INc=−1 とした。すなわち Ice Index がこの値以下になると、砕氷船エスコートが必要となる。砕氷船はそのセグメントのスタートポイントに瞬時に出現するものと仮定した。近年、衛星画像解析も含めた海上からの氷況観測技術は進歩しつつあり、予め氷況を予測した上でエスコート砕氷船を目的地に向かわせておくことは可能である。エスコートの終了判定は、次の様に行うことにした。エスコートを受けているセグメントの次のセグメントが単独航行可能となった時に、このセグメントを含む 12 セグメントの間（240 海里）にエスコートが必要となるセグメントが存在するかどうかを検索し、存在する場合にはそのセグメントまでは砕氷船を同行させる。次の 12 セグメント全てが単独航行可能な場合は、次のセグメントはエスコート終了と判定することにした。

船速と所用馬力

船速は単独航行、エスコートの各モードに対応した計算モデルで求めた。単独航行モードでは、船速分布は砕氷貨物船の Ice Index と船速の関係を用いて求めた。燃料費は、貨物船の燃費と貨物船の所要馬力および航海時間から求めた。セグメントの密接度が 0 の場合は開水中の馬力曲線を参照し、密接度が 0 より大きい場合には氷中の馬力曲線を参照して船速分布に対する所要馬力分布を求めた。エスコートモードでは、船速分布は砕氷船の船速分布とし、Ice Index と船速の関係を用いて船速分布を求めた。船速に対する所要馬力を平水中馬力曲線から求め、開水路中での馬力は摩擦抵抗や氷片接触を考慮してその 10%増しと仮定した。

コスト計算

コスト計算では、資本費、船員費、メンテナンス費、保険費、燃料費、砕氷船エスコート費、港費を算出した。航海日数やエスコート日数に依存するコストは、1航海のシミュレーションで計算された日数分布に Table 4 に示した単位コストを乗じて求めた。また、船の性能に依存するコストには燃料費があるが、これはセグメントの燃料消費量分布を順次積算した1航海の燃料消費量分布に単位コストを乗じて求めた。運航コスト（freight cost）は年間総コストを年間の総輸送量で除して求めた貨物1トン当たりの所要コストとした。

4.3 月別シミュレーション

NSR の航海日数は1ヶ月前後と予想され、各月の運航の特性を調査すれば年間の運航特性の傾向は把握できる。さらに過去数十年間の月別の特性も同じ月の出力分布を重ね合わせることで求められる。これらの分布から平均値や標準偏差の解析が可能である。このように、各年各月の環境データに基づく1航海のシミュレーションを月別シミュレーション（Monthly Voyage Simulation ：MVS）と呼ぶことにする。MVS ではシミュレーションの開始日を、各月の第一日と仮定し、出発港で荷物の積込みが開始される日と定義した。また、月別運航の特性を調べるため航海途中で月が変わっても環境データは変えないこととした。MVS では西向きの航海と東向きの航海では結果に差は現われない。

4.4 年間シミュレーション

一方、NSR の年間の運航経済性評価を行うためには、例えば季節に応じて NSR とスエズ経由を切り替える等現実的な運航を想定した評価が必要である。北航路及び南航路について、1年間で横浜～Hamburg 間を連続往復運航することを想定したシミュレーション(Annual Serial Voyage Simulation : ASVS)を計画した。ASVS では最終的には運航コストや年間輸送量が求められ、1年間全てスエズ経由の場合との同基準による比較が可能となる。

5. シミュレーション結果

5.1 砕氷船タリフの感度解析

NSR の運航が経済的に成り立つためには、NSR での運航採算がスエズ経由での運航採算と同等もしくは優れていることが必要となる。運航採算には 2 節で述べたコストテーブルを用いるが、この中で砕氷船タリフは運航採算に最も影響の大きい因子と考えられる。そこで、まず砕氷船タリフについて感度解析を行ない、シミュレーションで用いる現実的なタリフの値について検討した。条件として、砕氷貨物船の NSR の運航コストが同船がスエズ経由で運航した場合に比べて優位な期間が最低6ヶ月存在し、運航コストの年間平均で

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

も優位に立つことと仮定した。そこで、現状のタリフでこの条件を満たせるかどうか、満たせない場合はタリフをどの程度の値に設定するかを検討した。具体的には現行タリフとそれよりも低く（0.74 倍）設定したタリフを用い、各対象貨物船に対し 38 年間の平均環境データを用いた月別運航コストを計算し、スエズ経由の運航コストと比較した。その結果、現行タリフを用いた場合は、6 月～11 月の 6 ヶ月間でスエズ経由に比較して運航コストが低い値となるが、年間平均では運航コストが高い。しかし低く設定したタリフを用いると、運航コストが低い期間は 6 ヶ月と同じだが、年間平均では NSR の方が優位となった。ゆえに本シミュレーションではタリフの値として低く設定したタリフ（0.74 倍）を採用することとした。

5.2 MVS

横浜～ハンブルグ間の月別シミュレーション MVS を行い、1 航海の特性を調べた。40BC と 50BC が北航路を航行する場合及び 25BC の貨物船が南航路を航行する場合の 3 状態で行った。航行年は 1957 年～1990 年である。Fig. 9 は航海日数とエスコート日数の月別の傾向を示す。40BC の航海日数の最大は 2 月で 44.3 日、最小は 9 月の 30.7 日である。一方、50BC の航海日数の最大は 3 月で 42.7 日、最小は 9 月の 28.8 日である。NSR の通過時間は 40BC の方が 50BC より若干短いものの、総航海日数は逆に 50BC が 40BC より約 2 日短縮できる結果となった。これは 50BC の開水中速力が 40BC より約 2.5 ノット速いからであり、開水中速力が経済性に大きく寄与することを示唆している。NSR ではエスコート日数の航海日数に占める割合は 2 月～6 月では 50%を越えており、50BC が最も年間エスコート日数が多い。これは同じ北航路を運航する 40BC よりも砕氷能力が劣っているからである。25BC と 40BC は同じ砕氷能力を有するが、12 月～5 月は 25BC の通る南航路のエスコート日数が多く、逆に 6 月～11 月は 40BC が通る北航路のエスコート日数が多くなる。冬期は南航路には沿岸定着氷が発達し氷況が厳しくなるのに対し、北航路は沿岸定着氷の外縁を通り開水面が比較的多い航路となることから航海に有利であると考えられる。一方夏期は沿岸部沿いに開水面が発達するので沿岸部の方が有利である。

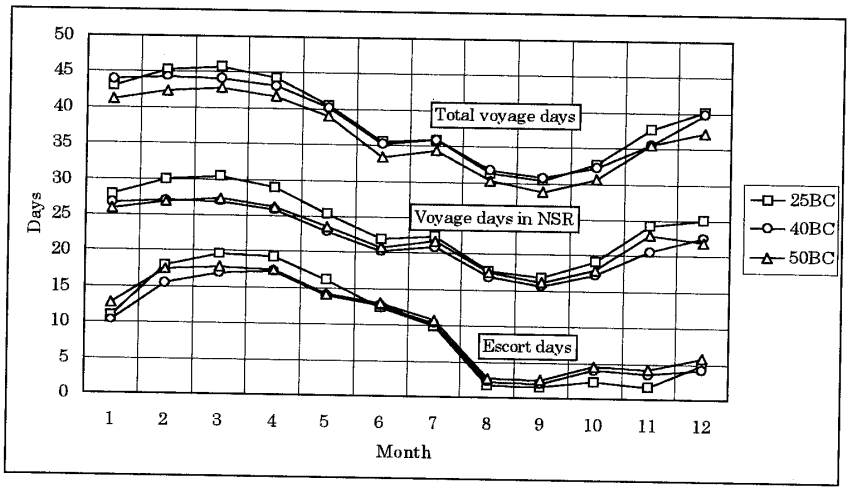

Fig.9 Voyage days and escort days for the 25BC, 40BC, and 50BC as average of 1957-1990

Fig. 10 は 50BC の 34 年間の海域別の平均船速を示している。全体的な傾向として冬期の１２月から５月までの間の船速は 4～7knot である。夏期の８月から１０月の間では 9～14knot に達する。傾向としては冬の期間の Laptev 海での船速は他の海域よりも若干速い。夏期は Chukchi 海での船速が大きい。全体傾向としては東シベリア海での船速が小さい。6 月に船速が急に上昇して 7 月に逆に船速が下降する現象が見られるが、これは氷況が緩んでエスコートモードから単独航海モードに移行するために、砕氷船の船速から貨物船の船速にスイッチすることから生じている現象である。25BC と 40BC の結果については、50BC と同様な傾向を示した。

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

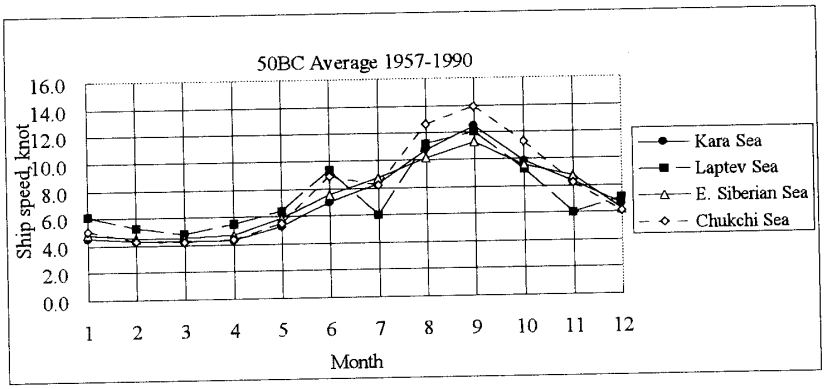

Fig. 10 Navigation speed for the 50BC by the sea area as an average of 1957-1990

Table 12は34年間の月別コスト構成を表している。年間傾向としては、６月～１０月では航海日数が短く、総コストが小さくなる。運航費と燃料費はほとんど変化が無いが、資本費は月によって大きく変化している。これは本来年間に対して一定である資本費を、１航海に対して評価するために日割りにして計算している理由による。エスコート日数は１月から７月にかけて増加し、８月から１２月にかけて減少しているが、砕氷船費は変化していない。これは一定料率を採用したことによる。50BC は 40BC、25BC に比べて多くの砕氷船費、燃料費、港費を必要とするが、資本費は低い。資本費が小さい事が大きく影響し、総コストは 50BC が最も小さくなった。

Table 12 The monthly voyage cost component for 25BC, 40BC and 50BC

	Capital cost			Operating cost			Port dues			Fuel cost			Icebreaker fee			Total cost		
Month	25BC	40BC	50BC	25BC	40BC	50BC	25BC	40BC	50BC	25BC	40BC	50BC	25BC	40BC	50BC	25BC	40BC	50BC
Jan.	754	894	384	260	270	279	61	67	92	237	242	164	121	126	163	1433	1599	1082
Feb.	799	907	393	275	274	286	61	67	92	183	174	127	126	130	167	1444	1552	1064
Mar.	806	901	397	278	273	289	61	67	92	165	145	128	127	131	167	1438	1517	1074
Apr.	780	882	387	269	267	282	61	67	92	150	128	122	127	131	167	1388	1474	1049
May	716	823	361	247	249	263	61	67	92	143	131	127	125	129	164	1292	1399	908
Jun.	628	720	310	216	218	226	61	67	92	113	110	118	122	126	161	1140	1241	907
Jul.	634	733	320	218	222	233	61	67	92	148	152	149	122	128	166	1184	1302	959
Aug.	551	649	281	190	196	205	61	67	92	182	207	185	116	122	160	1100	1242	923
Sep.	536	629	268	185	190	195	61	67	92	168	186	175	116	121	160	1067	1194	890
Oct.	577	661	285	199	200	207	61	67	92	205	198	172	117	123	162	1159	1250	918
Nov.	666	728	330	229	220	240	61	67	92	287	265	224	113	118	154	1357	1399	1041
Dec.	711	813	346	245	246	252	61	67	92	291	279	190	116	121	158	1423	1527	1039
Average	680	778	339	234	235	246	61	67	92	189	185	157	121	126	162	1285	1391	996

これまでの結果から判断すると運航コストと氷況すなわちIce Indexには相関があると考えられる。そこで10年間における月別運航コストと積算 Ice Index（セグメント距離×Ice Index）を算出した。40BC の場合をFig. 11に示す。ばらつきは有るが積算 Ice Index と運航コストの間には負の相関がある。40BC のスエズ経由の運航コストは 39.7$/t であり、Fig. 11 に示す様に１本の線で代表させると、積算 Ice Index が-26000 以下の場合はスエズ経由を利用した方が運航コストは安くなると判断される。NSR の利用形態としては通年航行が理想ではあるが、NSR の活用や効率的な運用方法を考える場合、厳寒期の運航コストが高くなる時期はスエズ経由を航行するのが現実的であろう。そこで、年間シミュレーションではNSR とスエズ経由切り替えを行うこととし、その判断基準として、航路で求められる積算 Ice Index を採用することにした。

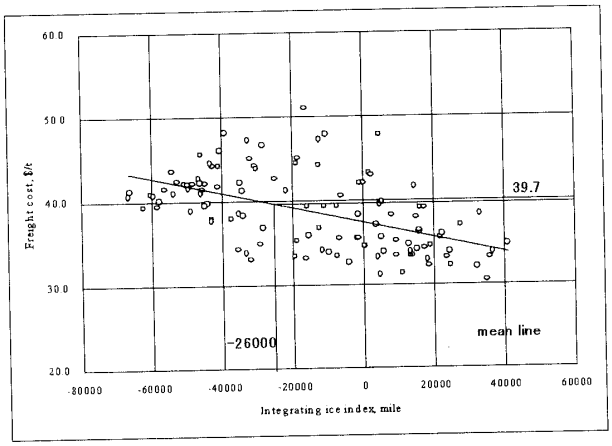

Fig. 11 Integrating Ice Index v.s. freight cost of 40BC (1980-1989)

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

5.3 西航路、東航路での運航シミュレーション

ロシアと極東およびロシアとヨーロッパの物流に、NSR を部分的に利用する場合のシミュレーション結果を述べる。横浜～Tiksi 間の東航路では1航海の総コストは$700,000～$900,000 に分布しており、資本費と運航費はそれぞれ横浜～Hamburg の約 1/2 となった。Dikson～Hamburg 間の西航路では1航海の総コストは$460,000～$660,000 に分布している。東航路と西航路の距離は、それぞれ 4,020 海里と 2,397 海里であり、二つの航路間の総コストの差の最も大きな要因はこの距離による。砕氷船のエスコート日数については、東航路は年間で 1 日～13 日、単独航海できる割合は全ての各月で 50%以上、特に8月から 11 月は 85%以上となる。西航路では年間で0日～3日であり、年間を通じて単独航海できる割合は 85%以上、特に7月～12 月は砕氷船エスコートは不要となる。

5.4 年間シミュレーション

横浜～Hamburg の年間往復連続シミュレーション（ASVS）を行った結果を述べる。航路は北航路で、対象は 40BC と 50BC である。ASVS では MVS の結果から、運航コストで不利になる冬期についてはスエズ経由を利用する事にした。NSR とスエズ経由の切替えについては、40BC と 50BC の比較や計算を簡素化するために切替え月を固定した。固定する月を定めるために、10 年間の各月の積算 Ice Index を解析して、積算 Ice Index の基準値（40BC の場合-26,000, 50BC の場合は -50,000）との比較を行った。40BC と 50BC 双方とも2月から5月はスエズ経由の方が運航コストで有利となるので、2 月～5 月の間にどちらかの港を出航する場合にはスエズ経由を選択することとした。計算年は 1960 年、1970 年、1980 年の3年を代表年として選んだ。計算結果の一例として 1980 年の 40BC と 50BC の計算結果を Table 13 と Table 14 に、また、各年の比較を Table 15 に示す。

Table 13 ASVS for 40BC in 1980

Voyage No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Departure-Arrival		0101-0213	0214-0326	0327-0506	0507-0616	0617-0725	0726-0826	0827-0925	0926-1028	1029-1203	1204-0113
Route		NSR	via Suez	via Suez	via Suez	NSR	NSR	NSR	NSR	NSR	NSR
Direction		E->W	W->E	E->W	W->E	E->W	W->E	E->W	W->E	E->W	W->E
Voyage days	days	43.6	41.0	41.0	41.0	38.2	31.2	29.7	32.5	35.7	40.3
Escort days	days	18.7				9.9	4.0	2.7	5.7	5.5	11.0
Voyage total cost	k$	1521	1428	1428	1428	1408	1203	1155	1241	1378	1493
*capital cost	k$	893	824	824	824	780	638	608	665	730	824
*operating cost	k$	270	238	238	238	236	193	184	201	221	249
*port fee	k$	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67
*fuel cost	k$	162	172	172	172	202	181	175	183	240	229
*icebreaker fee	k$	130				123	123	122	124	120	124
Suez canal fee	k$		127	127	127						

Table 14 ASVS for 50BC in 1980

Voyage No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Departure-Arrival		0101-0212	0213-0320	0321-0425	0426-0531	0601-0704	0705-0811	0812-0909	0910-1007	1008-1108	1109-1217	1218-0125
Route		NSR	via Suez	via Suez	via Suez	NSR	NSR	NSR	NSR	NSR	NSR	NSR
Direction		E->W	W->E	E->W	W->E	E->W	W->E	E->W	W->E	E->W	W->E	E->W
Voyage days	days	42.4	36.0	36.0	36.0	33.0	37.5	28.6	27.9	31.6	38.2	38.1
Escort days	days	19.4				13.8	9.2	4.3	2.7	5.8	8.8	17.4
Voyage total cost	k$	1079	1055	1055	1055	892	1049	869	860	931	1066	987
*capital cost	k$	394	329	329	329	307	348	266	259	294	355	354
*operating cost	k$	287	224	224	224	223	253	194	189	214	258	258
*port fee	k$	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
*fuel cost	k$	140	271	271	271	108	190	156	159	168	203	118
*icebreaker fee	k$	166				162	165	162	160	163	158	164
Suez canal fee	k$		139	139	139							

50BC の方が NSR においてもスエズ経由においても運航コストでは優位である。その理由として、(1)50BC の資本費が安く、総コストが低い、(2)NSR での航海日数に大きな差が無いために、50BC の方が総輸送貨物量が多い、(3) 50BC の方がスエズ経由では平水中船速が大きいので 40BC より航海数が増え総貨物輸送量が大きくなる、(4)タリフが1航海について一定料率であるため、エスコート日数の差の影響が大きく現れないこと等、が主な要因として挙げられる。以上のように、今回想定した仮定の基では、砕氷能力は優れているが船価が高い 40BC よりも、砕氷能力は小さいが船価がより小さい 50BC の方が、年間の採算が有利という結果が得られた。

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

Table 15 Total of annual cost, amount of transit cargo and freight costs

Year			1960		1970		1980	
Ship type			40BC	50BC	40BC	50BC	40BC	50BC
	Cargo tonnage	t	36000	47000	36000	47000	36000	47000
NSR	Number of voyage		6.6	6.5	6.5	6.1	6.7	7.4
	Total cargo tonnage	t	238,000	304,000	235,000	288,000	240,000	346,000
	Total cost	k$	9,147	6,304	9,025	6,189	8,926	7,100
	Freight cost	$/t	38.4	20.7	38.4	21.5	37.2	20.5
SUEZ	Number of voyage		3	4	3	4	3	3
	Total cargo tonnage	t	108,000	188,000	108,000	188,000	108,000	141,000
	Total cost	k$	4,281	4,222	4,281	4,222	4,281	3,167
	Freight cost	$/t	39.6	22.5	39.6	22.5	39.6	22.5
Total (NSR+SUEZ)	Total cargo tonnage	t	346,000	492,000	343,000	476,000	348,000	487,000
	Total cost	k$	13,428	10,526	13,306	10,411	13,207	10,267
	Freight cost	$/t	38.8	21.4	38.8	21.9	38.0	21.1

6．スエズ経由との運航採算比較

6.1 通常型ハンディサイズバルカーとの比較

本節では5節で述べた運航コストで最も有利な50BCとスエズ経由のみを運航するハンディサイズバルカー（C-50BC）との運航採算を検討する。C-50BC の運航コストを Table 16 に示す。

Table 16 Freight cost calculation for C-50BC via Suez canal

Ship type		C-50BC
DWT	ton	50,900
Gross tonnage	GT	28,000
Cargo tonnage	t	47,000
Ship speed	knot	15.0
Power NSO	PS	11,000
M/E FOC	t/day	35.72
D/G FOC	t/day	1.54
D/G FOC in port	t/day	3.08
Ship price	M$	22
Voyage distance	NM	11,588
Voyage days Total	day	39.2
Voyage days	day	32.2
Anchorage	day	6
Suez canal transit days	day	1
Number of voyage		9.3
Annual cost	k$	7,913
Capital cost	k$/year	2,488
Maintenance fee	k$/year	560
Insurance	k$/year	134
Crewing cost	k$/year	1,599
Fuel cost	k$/year	1,032
Port cost	k$/year	805
Suez canal transit tolls	k$	1,295
Total cargo tonnage	t/year	437,752
Freight cost	$/t	18.1
Cost per one-voyage	k$	850

C-50BC の航海速力は 15knot、積載貨物量は 50BC と同一の 47,000t と仮定した。航海日数は約 39 日、年間の航海数は 9.3 回、運航コストは 18.1$/t となった。この運航コストは Table 15 に示した 50BC の運航コストに比べて小さく、単純に比較すると 50BC はスエズ経由のハンディサイズバルカーに比べて不利であるという結果となる。しかしながら、本シミュレーションで設定している船価や砕氷船タリフは将来変動する可能性がある。そこで、最も運航コストに大きな影響を与える船価及び砕氷船タリフについて、もう少し広範囲なパラメトリックスタディを行い、スエズ経由と同程度の運航コストとなる条件を検討した。

6.2 船価と砕氷船タリフのパラメトリックスタディ

船価と砕氷船タリフについて以下の仮定を設けて運航コストを求めた。

1） MVS で得られた 50BC の結果(Table 12)を用いて横浜～Hamburg の簡易年間運航採算計算を行い運航コストを算出する。すなわち、1月1日に横浜出港として月別所要航海日数を用い順次入港日及び各コストを積算する。

2） ASVS と同様、NSR 経由の運航は6月～1月とし、氷況が厳しい2月～5月はスエズ経由の運航（3航海）とする。

3） 船価は現行値 30M$、 24M$ (0.8 倍)、18M$ (0.6 倍)及び 12M$ (0.4 倍)と変化させる。

4） 砕氷船タリフは 6.7$/GT（現行値）、 5.0$/GT (0.74 倍)、4.0$/GT (0.6 倍)、2.7$/GT (0.4 倍)及び 1.3$/GT (0.2 倍)と変化させる。

Fig. 12 はタリフと船価が運航コストに与える影響を示す。図中の○印は現行タリフ、△は現行の 0.76 倍、◇は 0.6 倍、□は 0.4 倍、×は 0.2 倍をそれぞれ示している。●印は Table 15 に示すスエズ経由を3航海する ASVS1980 年の結果で、本簡易推定結果と一致しており、簡易推定でも十分な精度が認められる。Fig. 12 から解る様に 50BC の船価が C-50BC と同一の 22M$の場合は、タリフが 2.0$/GT であれば、C-50BC と運航コストが同一になり、採算に乗ると推察される。それ以上に船価が高い場合は、さらにタリフが安くなる必要がある。

Fig.12 で 50BC の船価が C-50BC と同一（22M$）で、砕氷船タリフ(4.0$/GT)がスエズ運河通行料と同程度の場合に、距離の短い NSR 経由を通行するにもかかわらず 50BC の運航コストは 19$/ton となり有利とは

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

ならない。Table 17 に船価が 22M$のケースで C-50BC と 50BC がスエズ経由で横浜から Hamburg まで片道1航海した場合の運航コスト構成を示す。50BC の燃料費は C-50BC の燃料費の2倍以上となっている。すなわち50BC は出力 25000PS で船速 17 ノットを出すが、C-50BC は 11,000PS で 15 ノットを出す事が可能であり、燃料消費量が大きく異なるからである。これが 50BC のスエズ経由での運航コストを大きくする原因である。

Fig.13 に 50BC の開水中性能を C-50BC の性能と同一にしたと仮定した運航コストを示す。すなわち 50BC の船速が C-50BC の馬力曲線に従うと仮定した場合である。この場合は船価が 25M$の場合、タリフが 4.0$/GT（現行の 6 割：スエズ通行料とほぼ同一）で充分採算に乗ることになり、可能性は現実的なものとなる。したがって、砕氷型貨物船の開水中性能を如何に改善するかが、今後の大きな技術課題であると言えよう。

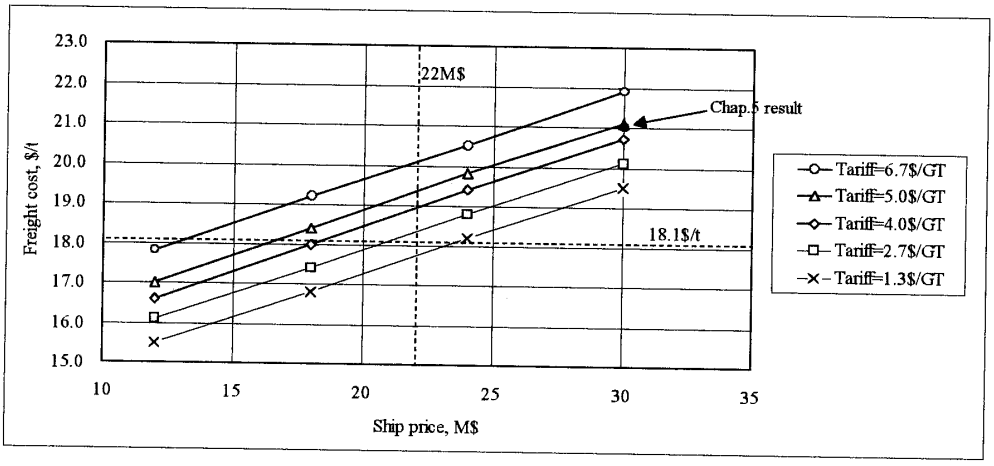

Fig. 12 Effect of ship price and tariff on freight cost for50BC

Table 17 Comparison of fuel cost between C-50BC and 50BC

		C-50BC	50BC
Total cost	K$	852	966
Capital cost	K$	268	240
Operating cost	K$	247	224
Port fee	K$	87	92
Fuel cost	K$	111	271
Suez canal fee	K$	139	139
Total cost/cargo tonnage	$/t	18.1	20.6
Voyage days	days	39	36

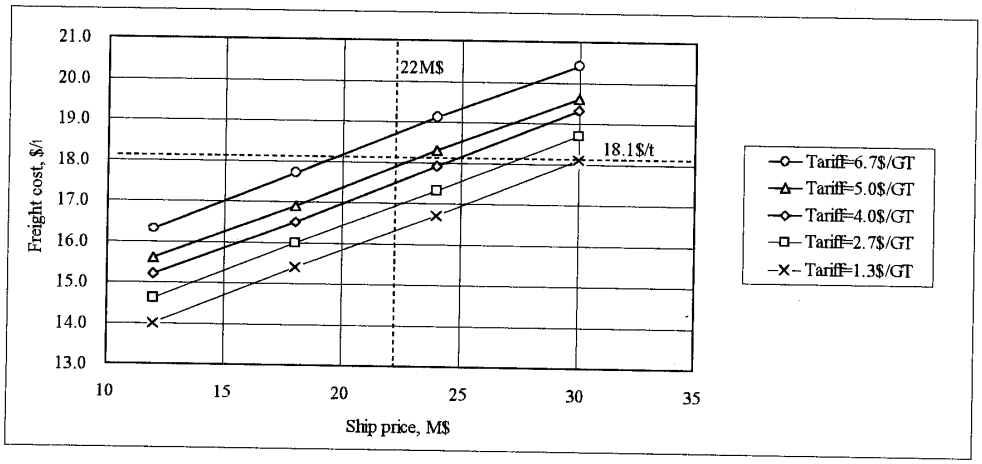

Fig. 13 Effect of ship price and tariff on freight cost for improved 50BC

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

7. 結 言

最も先進的な砕氷船技術と、歴史的かつ詳細な環境データを取り入れた包括的な運航シミュレーションを行った。本研究により以下の結論と提言が得られた。

(1) 北極海航路の運航シミュレーションを行うことにより、航路、年及び月別の砕氷船費用、砕氷船エスコート日数、航海日数等の費用構成を明らかにした。砕氷船タリフについてはロシア側の NSR の商業化に伴い、将来改善されるであろうが、これらのコストパラメータを用いて NSR の経済性評価を行う手法を整備することが出来た。

(2) 資本コストは費用パラメータの中で最も重要な影響を与えた。50BC は 25BC、40BC の強力な砕氷商船より経済的に有利である。砕氷能力を上げたために 40BC の船価が 50BC の約2倍となる事が原因である。冬期の 50BC のエスコート日数は 40BC に比べて若干多いが、夏期は差が無い。ゆえに本論文で仮定したエスコートシナリオでは、砕氷能力は中程度として、船価を下げ平水中の速力を重視した船を投入するのが得策と言える。

(3) Ice Index の概念は、氷況データと船速コードをリンクするために、ASPPR で導入された Ice numeral を参考にして修正を加えたものである。積算 Ice Index は与えられた氷況に対して、概略の船速を予測することが可能であり、NSR での航海の難易度を定量的に表す指標として利用可能である。

(4) 本研究で用いた砕氷貨物船の開水中の性能がハンディサイズバルカー並みの性能になり、タリフがスエズ通行料と同じレベルになれば、NSR は商業航路として経済的に充分成り立つと考えられる。ゆえに NSR にとって砕氷船タリフが今後どのように変動するかと共に、砕氷貨物船の開水中性能を如何に改善するかが今後の重要な技術課題であると言えよう。

謝 辞

NSR 運航シミュレーションが円滑に実施される様に各 WP 間の全体調整を行われた北海道大学の北川弘光教授に感謝の意を表します。また WP のコーディネーターとして御尽力された東京大学の山口一 助教授、東京商船大学の林尚吾 教授、船舶技術研究所の泉山耕 室長に感謝致します。また、スエズ運河通行料及び保険費、bunker price 等については日本郵船（株）殿のご好意により最新データを入手出来ました。この場を借りてお礼申し上げます。尚、本研究は競艇公益資金による日本財団の補助事業として、シップ・アンド・オーシャン財団が実施し、同財団からの委託を受けて実施したことを付記します。

参 考 文 献

1) Baskin, A., Buzuyev, A., Yakshevich, E., 1995, Operational Aspects, INSROP Working Paper No.17-1995, I .1.2.

2) Baskin, A. et al., 1998, Route and Associated Operational Infrastructure, INSROP Working Paper No.108-1998, The NSR Simulation Study Work Package 1.

3) Brestkin, S. et al., 1998, The NSR Simulation Study Work Package 2: Natural Conditions along the Selected Routes, INSROP Working Paper No.121-1998.

4) Isakov, A.N. et al., 1998, Potential Cargo Flow Analysis and Economic Evaluation for the Simulation Study, WP3, INSROP Working Paper 139, 1998.

5) Juurmaa, K. et al., 1998, The Service Ships, Part I: Model Tests in Ice with M-224, Part II: Design of 40,000dwt and 25 000dwt Icebreaking Bulk Carrier, INSROP Discussion Paper for Box B project.

6) Kitagawa, H., 1995, R&D Project of a Cargo Ship for the NSR, INSROP Symposium Tokyo, pp.453-457.

7) Kjerstad, N., 1994, Routing, Communication and IT-Customizing, INSROP Working Paper No.2-1994, I .1.1.

8) Riska, K. et al., 1997, Performance of merchant vessels in ice in the Baltic, Finnish Maritime Administration.

9) Patey, M. and Riska, K.,1999, Ship Transit Velocity Simulation algorithm, INSROP Working Paper No.155-1999.

10) Lensu, M. et al., 1996, Ice Environment and Ship Hull Loading along the NSR, INSROP Working Paper.

11) Lindquist, A., 1989, Straightforward method for calculation of ice resistance of ships, POAC '89.

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

12) Malmberg, S., 1983, On the phenomenon of getting stuck in ice, M. Sc. Thesis, Helsinki University of Technology, 1983.
13) Mikko Lensu et al, 1996, Ice Environment and Ship Hull Loading along the NSR, INSROP Working Paper.
14) Mulherin, N.D., D. T. Eppler, D.S. Sodhi (in prep.)., 1998, NSRSIM2A: A time and cost prediction model for Northern Sea Route Shipping. U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, USA.
15) Mulherin, N.D. et al., 1996, Development and Results of a Northern Sea Route Transit Model, U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory report 95-5.
16) Ono N., 1995, Variability of Arctic Sea Ice along the Northern Sea Route, The proceedings of INSROP Symposium Tokyo '95.
17) Proshutinsky et al., 1998, I.5.8, Environmental conditions affecting commercial shipping, INSROP Discussion Paper.
18) Schwarz, J., 1995, Can the Northern Sea Route Be Profitable, The proceedings of INSROP Symposium Tokyo '95.
19) Semanov, G. et al., 1998, Legal and Environmental Evaluation of the Selected Routes, Box B, Simulation of Ship Navigation along the NSR, INSROP Discussion Paper.
20) Ship & Ocean Foundation Research Report for the Northern Sea Route (In Japanese), 1998, the Ship and Ocean Foundation Project Report.
21) Tsoy,L.G. et al. 1998, Collection of SA-15 Operation Data, INSROP Working Paper No.107-1998, The NSR simulation study Work Package 5.
22) USAED, 1995, Northern Sea Route Reconnaissance Report, Vol. III, U.S. Army Engineering District, Anchorage, Alaska.
23) Wergeland, T., 1992, International challenges, the Fridtjof Nansen Institute journal, volume 12 number 1-1992, Special issue on the Northern Sea Route.
24) Yakovlev A. et al., 1999, Legal and environmental evaluation of the routes selected for the INSROP simulation study, INSROP Working Paper No.128-1999.

NII-Electronic Library Service